

文章编号: 0253-2239(2006)12-0159-7

应用马赫-曾德尔调制器的光微波链路建模*

王伟南 李艳和 郑小平 张汉一

(清华大学集成光电子学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 在考虑马赫-曾德尔调制器(MZM)的消光比、双臂驱动不平衡等非理想特性参量对其进行细致的理论建模的基础上,建立了包括光源、双臂驱动马赫-曾德尔调制器、光传输模块、光电探测器的基本光微波链路模型,并得到双边带调制(DSB)和单边带调制(SSB)链路的全阶解析响应结果,着重分析不同调制方式下马赫-曾德尔调制器对光微波链路幅度和相位(延时)性能的影响。理论计算和数值仿真结果表明,对双边带调制链路,消光比和双臂驱动不平衡度影响链路的幅频特性而不影响相位特性,对单边带调制链路,二者同时影响链路的幅频和相频特性。理论模型和数值结果可为使用马赫-曾德尔调制器的光微波系统如光纤无线电(RoF)和光控微波波束形成网络等提供定性和定量性能分析的基础。

关键词: 光电子学; 马赫-曾德尔调制器; 微波光子学; 光微波

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

Modelling of Fiber Radio Link Using Mach-Zehnder Modulator

Wang Weinan Li Yanhe Zheng Xiaoping Zhang Hanyi

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Based on the detailed theoretical modelling of Mach-Zehnder Modulator (MZM), considering non-ideal parameters such as extinction ratio and driven-signal unbalanced ratio, a fundamental fibre radio link is presented including optical source, dual-electrode-drive MZM, optical transmission module and photodiode. The all-order analytic responses using dual side band (DSB) and single side band (SSB) modulation schemes are derived. The analysis concentrates on how MZM affects the amplitude and phase (time delay) response performance of a fibre radio link under different modulation modes. According to the theoretical and numerical results, the extinction ratio and driven-signal unbalanced ratio affect only the amplitude response performance of DSB modulation link but affect both the amplitude and the phase response performance of SSB modulation link. The theoretical model and numerical results can provide the basis of qualitative and quantitative analysis of fibre radio application system using MZM such as radio over fibre (RoF) and optical controlled microwave beam forming network.

Key words: optoelectronics; Mach-Zehnder modulator; microwave photonics; fibre radio

1 引言

微波光子学是一门光子与微波技术相结合的新兴学科^[1],其中光纤无线电技术(Radio over fiber)^[2]、光控波束形成技术^[3]、光子微波信号发生及处理技术^[4]等微波光子学的分支方向得到了广泛的重视和研究,有望在无线通信、雷达与智能天线、

太赫兹(THz)应用等领域的发展中取得突破。

光微波系统是一种负载波调制(SCM)系统,总的来说,将微波信号调制到光载波上可采用直接调制和外调制两种调制方式,相应的链路可称为直接调制链路和外调制链路。直接调制一般在微波频率较低的情况下(如 <10 GHz)采用。而光微波技术

* 自然科学基金(60432020)和中德合作基金(60520130298)资助课题。

作者简介: 王伟南(1981-),男,黑龙江人,硕士研究生,主要从事光微波方面的研究。

E-mail: wangwn@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 李艳和(1956-),男,辽宁人,博士生导师,主要从事光通信、光网络、半导体集成光电子技术、微电子技术等领域的研究。E-mail: liyh@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2006-04-14; 收到修改稿日期: 2006-06-02

的最大优势在于利用光子技术传输和处理高频微波信号,比如 60 GHz 频段厘米波/毫米波无线通信系统、THz 应用等被认为是光微波技术不可替代的应用(Killer applicaton)领域,在这些高频微波系统应用中,需要采用外调制技术。常用的外调制器有电吸收调制器(EAM)和马赫-曾德尔调制器(MZM)。其中马赫-曾德尔调制器是光微波系统中应用较多的外调制器,可分为单臂驱动(single-electrode-drive)和双臂驱动(dual-electrode-drive)两种形式,与电吸收调制器相比,马赫-曾德尔调制器具有调制带宽大、调制方式灵活等优点,而双臂驱动马赫-曾德尔调制器较单臂驱动马赫-曾德尔调制器可控参量更多,可通过控制双臂微波信号的相位关系实现双边带(DSB)、单边带(SSB)^[5]等多种调制方式。

不同的光微波应用系统对系统性能要求的侧重点不同,如光纤无线电技术系统对系统幅频特性讨论较多,而光控波束形成网络对系统相频(延时)特性要求较高等。而不同的马赫-曾德尔调制器驱动方式和调制方式对光微波系统性能影响不同,文献[5]分析讨论了应用双臂驱动马赫-曾德尔调制器的光微波链路幅频和相频特性,但其模型为理想的马赫-曾德尔调制器模型。非理想情况下,马赫-曾德尔调制器双臂具有不对称性,包括直流和交流驱动的不对称。文中主要通过理论建模和数值计算,考虑双臂驱动马赫-曾德尔调制器的消光比(直流不对称)、双臂驱动不平衡度(交流驱动不对称)等非理想参量,分析光微波链路的幅频特性和相频性能,分析结果表明非理想参量对链路的幅度和相位性能影响显著,因而在实际应用马赫-曾德尔调制器的光微波系统中需要考虑这些参量对系统性能的影响,并加以利用或抑制。

2 光微波链路建模

一条基本光微波链路如图 1 所示,由光源、调制器、传输模块、光电探测器(PD)组成,其中传输模块表示不同光微波应用系统中的传输器件,比如在光纤无线电技术系统中为光纤,在光控波束形成网络

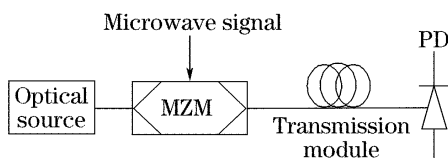


图 1 基本光微波链路框图

Fig. 1 Fundamental fiber radio link

中可为光纤光栅等延时器件。

为了突出分析马赫-曾德尔调制器性能对光微波链路的影响,对光源、传输模块、光电探测器采用相对简单的模型建模如(1)式、(2)式、(4)式所示。

光源光场:

$$E_{LD}(t) = E_i \exp(-j\omega_0 t), \quad (1)$$

其中 E_i 表示光场幅度, ω_0 表示光源频率。

传输模块传输函数(忽略损耗):

$$H_L(\omega) = \exp(-j\theta), \quad (2)$$

其中 $\theta = \theta_0 + \theta_1(\omega - \omega_0) + \frac{\theta_2}{2}(\omega - \omega_0)^2$, θ_1 表示群延时,为理想情况下光微波链路的延时值, θ_2 表示色散,可定义如下:

$$\theta_2 = \beta_2 L = -\lambda_0^3 DL / (2\pi c), \quad (3)$$

其中 β_2 、 D 、 L 分别为传输模块的等效群速色散、等效色散系数和光传输长度, λ_0 为光源工作波长, c 为真空中光速。

光电探测器采用平方律模型:

$$i_{PD}(t) = RE_{PD}(t)E_{PD}^*(t)/2, \quad (4)$$

其中 $E_{PD}(t)$ 为光电探测器输入光场, R 为光电探测器响应度。

双臂驱动马赫-曾德尔调制器具体结构如图 2 所示。

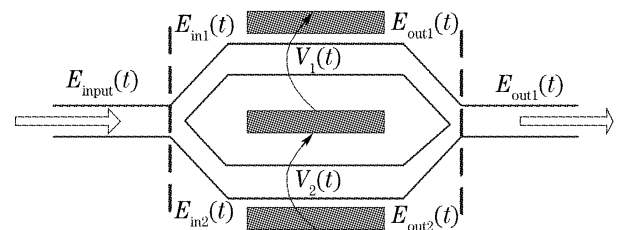


图 2 双臂驱动马赫-曾德尔调制器

Fig. 2 Dual-electrode-drive Mach-Zehnder modulator

图 2 中 $V_i(t) = V_{DCi} + V_{RFi} \sin(\omega_f t + \Phi_i)$ 为马赫-曾德尔调制器的驱动信号,包括直流偏置 V_{DCi} 和微波信号,其中 V_{RFi} 为微波信号幅度, ω_f 为频率, Φ_i 为相位。

双臂马赫-曾德尔调制器输出光场可用(5)式表示:

$$E_{MZM}(t) = \frac{E_i}{2} \left\{ \exp \left[j \frac{\pi V_1(t)}{V_\pi} \right] + \gamma \exp \left[\frac{\pi V_2(t)}{V_\pi} \right] \right\} \exp(j\omega_0 t), \quad (5)$$

其中 V_π 为马赫-曾德尔调制器半波电压, γ 为马赫-曾德尔调制器双臂的分路-耦合比,其与马赫-曾德尔调制器直流消光比 ϵ 的关系为 $\gamma = (\sqrt{\epsilon} - 1) / (\sqrt{\epsilon} + 1)$ ^[6],

理想情况下 $\gamma = 1$, 对应消光比为 ∞ 。

3 光微波链路性能分析

与单臂驱动马赫-曾德尔调制器相比, 双臂驱动马赫-曾德尔调制器的通过控制双臂信号可以实现多种调制方式, 特别是利用其实现单边带调制已经成为光微波系统中一种常用的色散抑制措施。根据第 2 节的理论模型分析双臂驱动马赫-曾德尔调制器双边带调制和单边带调制两种常用调制方式下光微波链路的幅频和相频特性。

由(5)式可得双臂驱动马赫-曾德尔调制器的输出光场如(6)式所示:

$$E_{M2M}(t) = \frac{E_i}{2} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} I(n) \exp[jn(\omega_i t + \Phi_m)] \right\} \times \exp(j\omega_0 t), \quad (6)$$

式中

$$I(n) = \exp[j(\Phi_v + n\Phi_d)] J_n(m_1) + \gamma J_n(m_2) \exp[-j(\Phi_v + n\Phi_d)],$$

其中 $\Phi_v = \pi(V_{DC1} - V_{DC2})/2V_\pi = -\pi/4$, 即马赫-曾德尔调制器直流偏置在负斜率线性工作点, $\Phi_m = (\Phi_1 + \Phi_2)/2$, $\Phi_d = (\Phi_1 - \Phi_2)/2$, $J_n(m_R)$ 为第 n 阶贝塞尔(Bessel) 函数, $m_{1,2} = \pi V_{RF1, RF2}/V_\pi$ 为两臂的调制系数。考虑到双臂的驱动不平衡度, 设两臂调制系数分别为: $m_{1,2} = m(1 \pm \delta)$, δ 表示双臂驱动不平衡度。由(2)式、(4)式、(6)式得接收端光电探测器输出电流如(7)式所示:

$$i_{PD}(t) = \frac{RE_i^2}{8} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{p=-\infty}^{+\infty} I_n I_{n-p}^* \times \exp\{j[p\omega_i \tau + p(2n-p)\theta_2 \omega_i^2/2]\}, \quad (7)$$

其中 $\tau = t + \theta_1$ 。

将光电探测器输出电流分为直流项和微波信号项, 如(8)式所示:

$$i_{PD}(t) = \frac{RE_i^2}{8} \left[I_{DC} + 2 \sum_{p=1}^{+\infty} I_{RF}(p) \right], \quad (8)$$

其中微波信号项如(9)式所示:

$$I_{RF}(p) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} RL(I_n I_{n-p}^*) \cos[p\omega_i \tau + p(2n-p)\theta_2 \omega_i^2/2] - IM(I_n I_{n-p}^*) \sin[p\omega_i \tau + p(2n-p)\theta_2 \omega_i^2/2], \quad (9)$$

取(9)式中 $p=1$ 即可得到接收端信号项。

(9)式为应用双臂驱动马赫-曾德尔调制器光微波链路的全阶响应, 可用于分析马赫-曾德尔调制器任意偏置和驱动时的链路性能, 实际应用系统中, 出于系统线性性能的考虑, 光微波系统一般采用小信号调制, 多数情况下满足 $m_{RF} < 0.5$, 此时根据贝塞尔函数的特性可以忽略高阶项, 取(9)式中的两项即可得接收到的微波信号项。

下面针对双边带调制、单边带调制两种调制方式进行讨论。

3.1 双边带调制光微波链路性能分析

双边带调制方式下, $\Phi_1 - \Phi_2 = \pi$, 小信号调制时, 取(9)式的前两阶可得光电探测器输出微波信号如(10)式所示:

$$I_{RF}(1) = 2\{\gamma[J_0(m_1)J_1(m_2) + J_0(m_2)J_1(m_1)]\cos(\theta_2 \omega_i^2/2) - [J_0(m_1)J_1(m_1) - \gamma^2 J_0(m_2)J_1(m_2)]\sin(\theta_2 \omega_i^2/2)\}\cos(\omega_i \tau + \Phi_m), \quad (10)$$

理想情况 $\delta = 0, \gamma = 1$ 时, (10)式化为(11)式

$$I_{RF}(1) = 4J_1(m)J_0(m)\cos(\theta_2 \omega_i^2/2)\cos(\omega_i \tau + \Phi_m), \quad (11)$$

由(11)式可以看出, 双边带调制链路幅频响应为色散、微波频率相关的余弦函数, 即在一定的传输距离和微波频率下存在色散导致的功率衰落现象, 该现象限制光微波链路的工作带宽和传输距离。若传输模块以普通单模光纤为例, 取(3)式中 $\lambda_0 = 1550$ nm, $D = 17$ ps/(nm · km), 传输距离为 25 km, 则功率第一零点对应的微波频率约为 12.1 GHz, 取微波频率为 10 GHz, 则功率第一零点对应的传输距离约为 36.7 公里。

由(10)式可见, 双臂驱动马赫-曾德尔调制器在双边带调制方式下其不理想参量——消光比和驱动

不平衡度影响链路的幅频特性, 但不影响链路的相频特性。下面分 $\delta=0$ 和 $\gamma \approx 1$ 两种情况讨论。

当 $\delta=0$ 时, 马赫-曾德尔调制器平衡驱动, (10)式化为(12)式:

$$I_{RF}(1) = 2J_1(m)J_0(m)\cos(\theta_2 \omega_i^2/2 + \phi) \times \cos(\omega_i \tau + \Phi_m), \quad (12)$$

其中 $\phi = \arctan[(1-\gamma^2)/2\gamma]$, 如果系统工作在正常色散区 $\theta_2 < 0$ (如 1550 nm 波段), 由(12)式可以看出马赫-曾德尔调制器消光比起到抑制色散的作用, 消光比越小, 即马赫-曾德尔调制器分路-耦合比越小, 色散抑制作用越好。取传输模块为普通单模光

纤,调制系数 $m=0.1$,图 3 为不同马赫-曾德尔调制器消光比时双边带调制链路的归一化(以零频为参考点)功率响应曲线,从图 3 可以明显看出消光比对

色散的抑制作用,如归一化功率~传输距离曲线中马赫-曾德尔调制器消光比为 10 dB 时较 20 dB 时第一功率零点延长约 10 km。

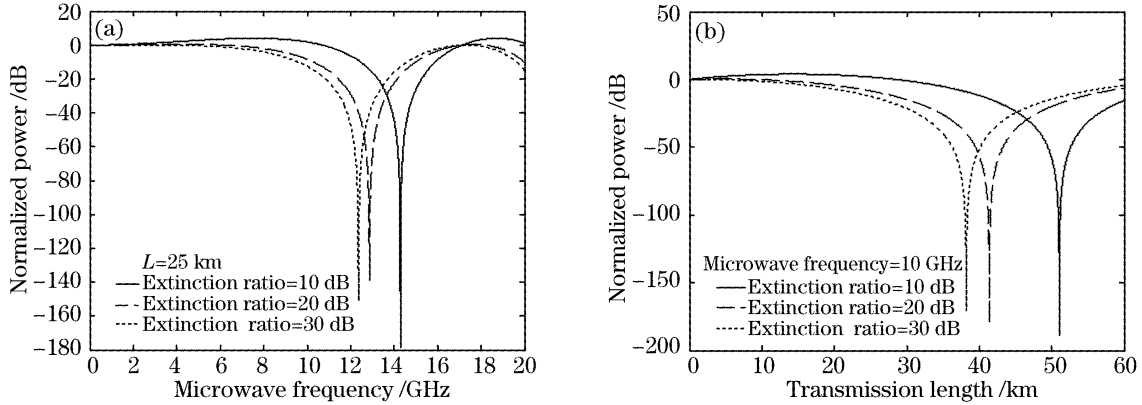


图 3 不同消光比时双臂驱动马赫-曾德尔调制器链路。(a) 归一化功率-微波频率曲线 (b) 归一化功率-传输距离曲线
Fig. 3 Normalized power response versus microwave frequency (a) and transmission length (b) of dual-electrode-drive Mach-Zehnder modulator dual side band link with different extinction ratios

当 $\gamma \approx 1$ 时,(10)式化为(13)式:

$$I_{\text{RF}}(1) = 4\cos(\theta_2\omega_i^2/2 + \phi)\cos(\omega_i\tau + \Phi_m), \quad (13)$$

其中 $\phi = \arctan\left\{\frac{\delta m [J_0(m)/2 - J_1(m)]}{J_1(m)J_0(m)}\right\}$,如果系统

工作在正常色散区 ($\theta_2 < 0$),小信号调制时有 $J_0(m)/2 > J_1(m)$,由(13)式可看出双臂驱动不平衡度可以起到抑制色散($\delta > 0$)或增强色散($\delta < 0$)的作用,上述结论是在马赫-曾德尔调制器直流偏置在负斜率线性工作点即 $V_{\text{DC1}} - V_{\text{DC2}} = -V_\pi/2$ 时得到的,从理论计算过程可以发现,当直流偏置在正斜率线性工作点即 $V_{\text{DC1}} - V_{\text{DC2}} = V_\pi/2$ 时, $\delta > 0$ 增强

色散, $\delta < 0$ 抑制色散。定义 $\Delta V_{\text{DC}} = V_{\text{DC1}} - V_{\text{DC2}}$, $\Delta V_{\text{RF}} = V_{\text{RF1}} - V_{\text{RF2}}$,则根据上述结果, $\Delta V_{\text{DC}}\Delta V_{\text{RF}} < 0$ 时驱动不平衡度起到抑制色散的作用, $\Delta V_{\text{DC}}\Delta V_{\text{RF}} > 0$ 驱动不平衡度到增强色散的作用。

以马赫-曾德尔调制器偏置在负斜率线性工作点情况为例,取传输模块为单模光纤,微波信号频率为 10 GHz,调制系数为 0.1,马赫-曾德尔调制器消光比 20 dB,做归一化功率~传输距离曲线如图 4 所示,由图 4 可以看出正负驱动不平衡度对色散的抑制和增强作用。

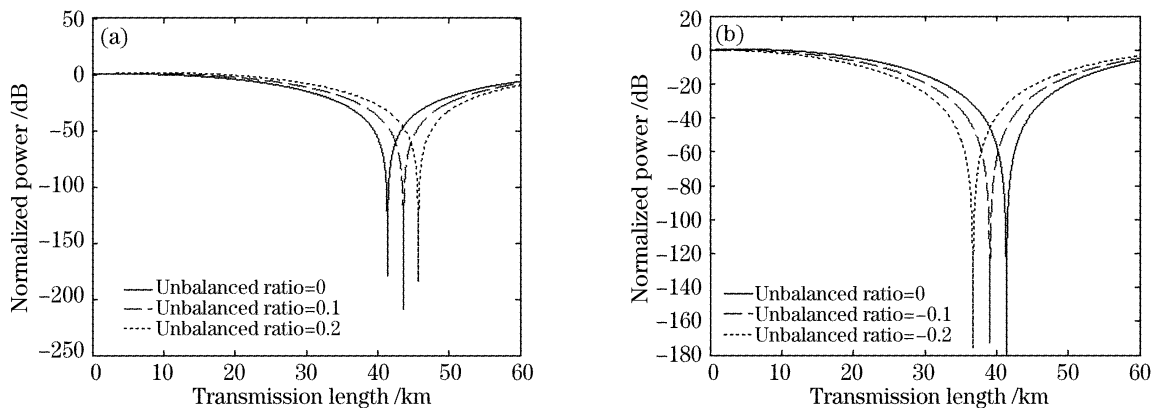


图 4 正(a),负(b)驱动平衡度下双臂驱动马赫-曾德尔调制器链路归一化功率-传输距离响应曲线

Fig. 4 Normalized power-transmission length response of dual-electrode-drive Mach-Zehnder modulator link with positive (a) and negative (b) unbalanced ratio

3.2 单边带调制光微波链路性能分析

单边带调制时, $\Phi_1 - \Phi_2 = \pi/2$,小信号调制下,取(9)式的前两阶可得光电探测器输出微波信号如(14)式所示:

$$I_{\text{RF}}(1) = RL(I_0 I_{-1}^*)\cos(\omega_i\tau + \Phi_m - \theta_2\omega_i^2/2) - IM(I_0 I_{-1}^*)\sin(\omega_i\tau + \Phi_m - \theta_2\omega_i^2/2) + RL(I_1 I_0^*)\cos(\omega_i\tau + \Phi_m + \theta_2\omega_i^2/2) - IM(I_1 I_0^*)\sin(\omega_i\tau + \Phi_m + \theta_2\omega_i^2/2), \quad (14)$$

其中：

$$RL(I_0 I_{-1}^*) = \frac{-1}{\sqrt{2}} [J_1(m_1) - \gamma J_1(m_2)] [J_0(m_1) - \gamma J_0(m_2)],$$

$$IM(I_0 I_{-1}^*) = \frac{-1}{\sqrt{2}} [J_1(m_1) - \gamma J_1(m_2)] [J_0(m_1) + \gamma J_0(m_2)],$$

$$RL(I_1 I_0^*) = \frac{1}{\sqrt{2}} [J_1(m_1) + \gamma J_1(m_2)] [J_0(m_1) + \gamma J_0(m_2)],$$

$$IM(I_1 I_0^*) = \frac{1}{\sqrt{2}} [J_1(m_1) + \gamma J_1(m_2)] [J_0(m_1) - \gamma J_0(m_2)],$$

理想情况 $\gamma=1, \delta=0$, (14) 式化为 (15) 式：

$$I_{RF}(1) = 2\sqrt{2}J_0J_1\cos(\omega_f\tau + \Phi_m + \theta_2\omega_i^2/2), \quad (15)$$

即此时链路的幅频响应为常数，与色散、微波频率、传输距离无关，消除了色散引起的功率衰减，这是单边带调制的最主要作用。但由 (15) 式也可以看出色散项转移到信号相位中，影响链路的相频特性，这一点不同于前面讨论的在双边带调制方式下的链路特性。

非理想条件下，接收信号的幅频和相频特性都与消光比和驱动不平衡度相关。下面从 (14) 式出发用数值分析的方法观察消光比和双臂驱动不平衡度对链路幅频和相频特性的影响，传输模块仍以普通单模光纤参量为例。

图 5 为在 $\delta=0$ 时，消光比不同对链路归一化功率响应和相对相位响应（减掉群延时相位项）的影响。

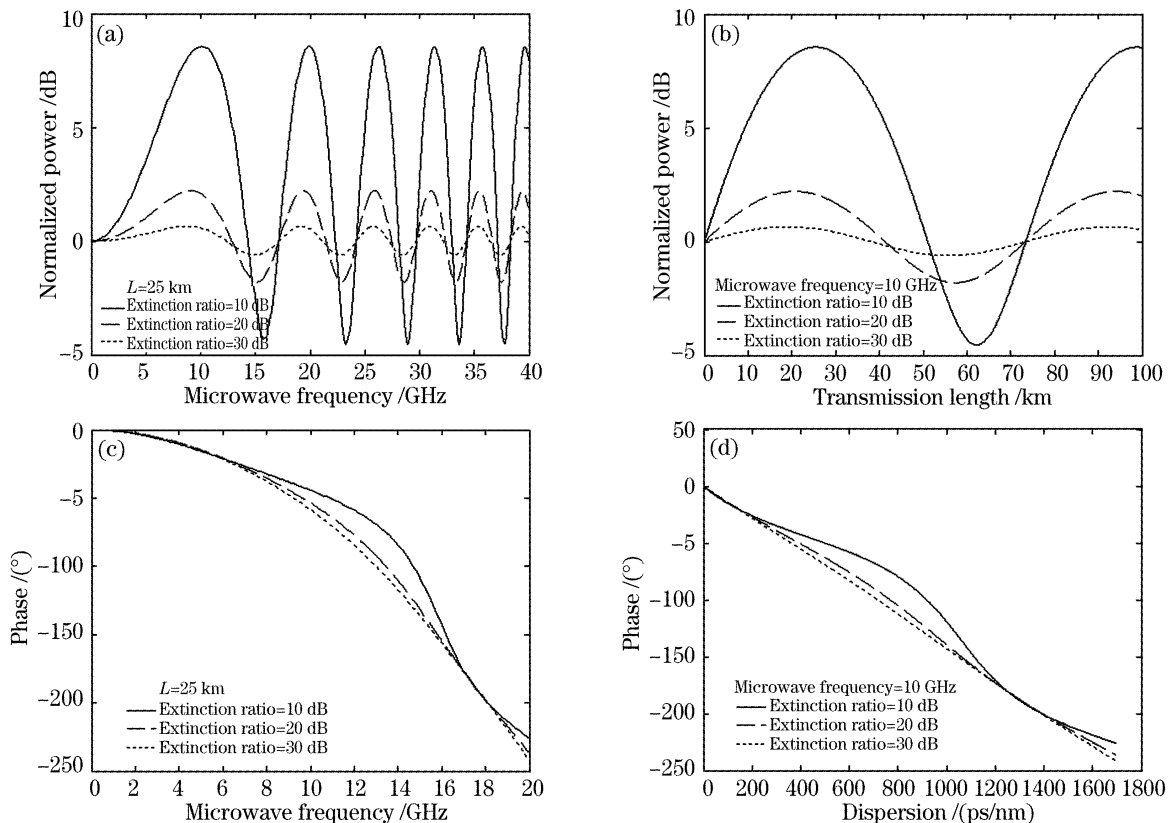


图 5 不同消光比时双臂驱动马赫-曾德尔调制器单边带调制链路。(a) 归一化功率-微波频率曲线，(b) 归一化功率-传输距离曲线，(c) 相对相位-微波频率曲线，(d) 相对相位-色散曲线

Fig. 5 For single-electrode-drive Mach-Zehnder modulator single side band-modulation link with different extinction ratios. (a) Normalized power versus microwave frequency, (b) normalized power versus transmission length, (c) relative phase versus microwave frequency, (d) relative phase versus dispersion

由图 5(a)、图 5(b) 可见，消光比越大，则马赫-曾德尔调制器单边带调制抑制色散的效果越好，但消光比为 20 dB 的双臂驱动马赫-曾德尔调制器单

边带调制链路仍存在约 4 dB 的功率抖动。由图 5(c)、图 5(d) 可见，单边带调制时色散对微波信号的相位影响较大，消光比性能越差则相位偏离理想情

况附加相位值 $\theta_2 \omega_i^2 / 2$ 越大。

总之,从物理意义上看,消光比越大,则马赫-曾德尔调制器双臂的功率分路-耦合比对称性越好,则单边带调制时残留边带越小,故色散抑制性能越好,残留边带对信号相位的影响也越小。

下面讨论消光比一定时,双臂驱动不平衡度对系统幅频和相频性能的影响,图 6 为消光比为 20 dB 时,不同驱动不平衡度对链路归一化功率响应和相

对相位响应(减掉群延时相位项)的影响。

由图 6(a)、图 6(b)可见,驱动不平衡度越小,则马赫-曾德尔调制器单边带调制抑制色散的效果越好,驱动不平衡度为 0.1 时双臂驱动马赫-曾德尔调制器单边带调制链路存在约 8 dB 的功率抖动。由图 6(c)、图 6(d)可见,双臂驱动不平衡度性能越差则相位偏离理想情况相位值 $\theta_2 \omega_i^2 / 2$ 越大。

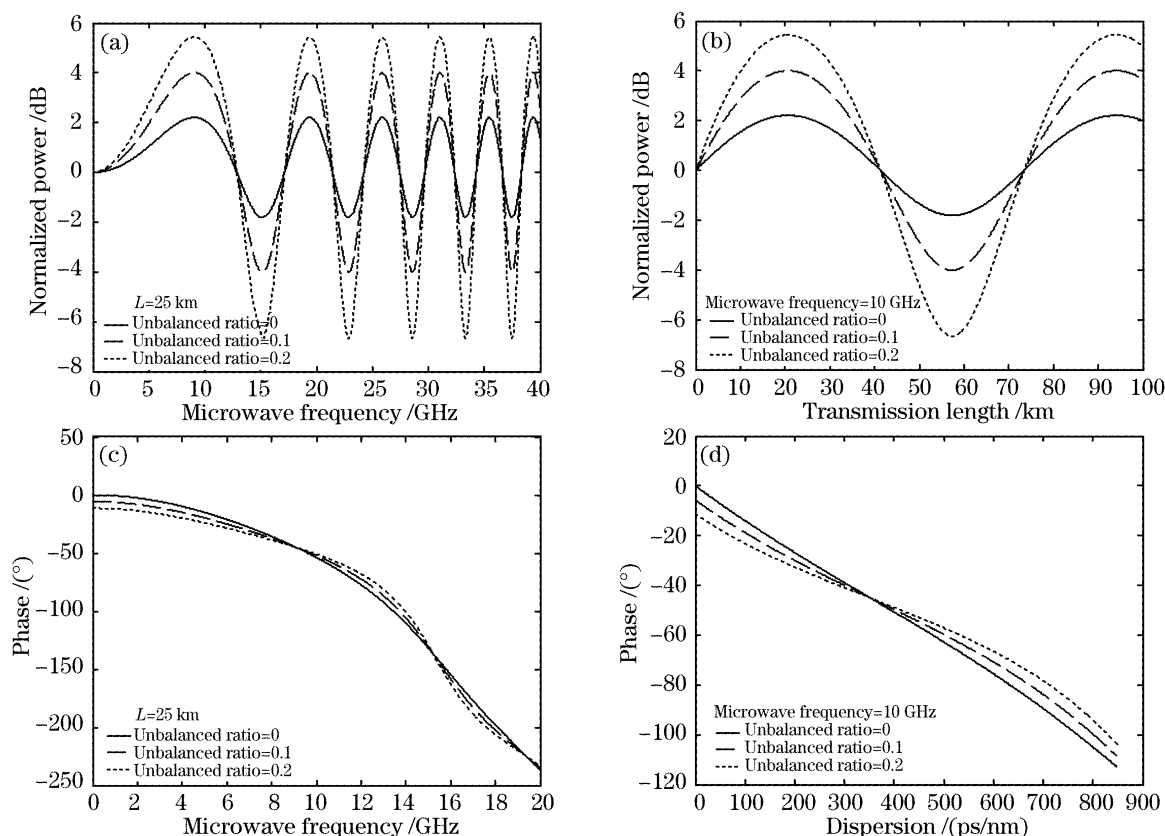


图 6 不同驱动不平衡度时双臂驱动马赫-曾德尔调制器单边带调制链路。(a)归一化功率-微波频率曲线,(b)归一化功率-传输距离曲线,(c)相对相位-微波频率曲线,(d)相对相位-色散曲线

Fig. 6 For single-electrode-drive Mach-Zehnder modulator single side band-modulation link with different unbalanced ratios.

(a) Normalized power versus microwave frequency, (b) normalized power versus transmission length, (c) relative phase versus microwave frequency, (d) relative phase versus dispersion

总之,从物理意义上看,驱动不平衡度越小,则单边带调制时残留边带越小,故色散抑制性能越好,残留边带对信号相位的影响也越小。

4 结 论

通过光微波链路的基本理论模型着重分析了双臂驱动马赫-曾德尔调制器对链路幅频和相频性能的影响,分析中考虑了双臂马赫-曾德尔调制器的两种不对称参量-直流消光比和交流双臂驱动不平衡度。理论分析和数值结果表明:

1) 对于双边带调制链路,消光比起到抑制色散的作用,消光比越小则色散抑制效果越好,而 ΔV_{DC}

$\Delta V_{RF} < 0$ 驱动不平衡度越大则色散抑制效果越好,反之结论相反。此时相频特性不受消光比和驱动不平衡度的影响。

2) 对于单边带调制链路,消光比和驱动不平衡度皆起到恶化链路幅频和相频性能的作用。二者皆减弱单边带调制抑制色散的作用,导致幅频响应曲线波动。同时引起相频响应曲线偏离理想值,这一点在光控波束形成等需要控制延时特性的光微波应用中需要根据具体要求考虑对系统性能的影响。

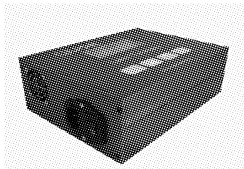
文中理论模型和数值结果可为采用马赫-曾德尔调制器的光微波应用系统提供设计参考和定性、定量的理论分析基础。

参 考 文 献

- 1 Alwyn J. Seeds. Microwave photonics[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technics*, 2002, **50**(3): 877~887
- 2 Hamed Al-Raweshidy, Shozo Komaki. *Radio over Fiber Technology for Mobile Communications Networks* [M]. Boston, London: Artech House, 2002
- 3 T. Merlet. Photonics for RF signal processing in radar systems [C]. *IEEE International Topical Meeting*, 2004. 305~308
- 4 Robert A. Minasian. Photonic signal processing of microwave signals [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technics*, 2006, **54**(2): 832~846
- 5 Juan L. Corral, Javier Marti, Jose M. Fuster. General expressions for IM/DD dispersive analog optical links with external modulation or optical up-conversion in a Mach-Zehnder electrooptical modulator [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technics*, 2001, **49**(10): 1968~1976
- 6 Hoon Kim, Alan H. Gnauck. Chirp characteristics of dual-drive Mach-Zehnder modulator with a finite DC extinction ratio [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2002, **14**(3): 298~300

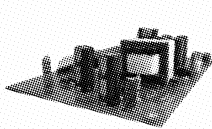
· 广 告 ·

LT100 光镊



集成的光镊系统
 功率稳定度<0.1%
 双光臂差异<0.3%
 不占用显微镜入光口
 单模光纤输出
 光臂夹持监测
 尺寸: 205*150*72 mm

LDD100高精度激光驱动模块



偏置电流: 0-1A
 自动温度控制回路
 TEC电流: 2A(最大)
 显示输出模块可选

L100高精度连续激光器

200-1700nm波长可选
 功率稳定度 <1%
 高功率半导体制冷

LDD300 大功率连续激光驱动器



偏置电流: 0-100A
 TEC最大输出: 400W
 尺寸: 405*250*85 mm
 超温, 过压过流以及静电保护
 其他波长和功率激光器可定制

HPL30 大功率连续激光器

80W 808nm或980nm波长
 功率稳定度 <1%
 体积小, 效率高

我们也提供以下产品:

单光子源, 单光子探测器, 光纤传感器, 亚纳秒短脉冲发生器, 各种半导体、固体激光器, 各种探测器, 以及光电检测和基于光电手段的监控解决方案。

诚征全国代理

QLINK 深圳市量子通科技有限公司

www.qulinktech.com.cn Tel: 86-755-26993898 / 86147755 Fax: 86-755-26993182 sales@qulinktech.com