

高性能光调制器性能测试研究

颜强 黄永清 段晓峰 王伟 颜鑫 任晓敏 黄辉 王琦 张霞

(北京邮电大学信息光子学与光通信研究院, 北京 100876)

摘要 随着光通信的高速发展,精确测量高性能光调制器的高速性能的需求与日俱增。为了精确测量一个频响特性高达 35 GHz 的光调制器,搭建了一个 40 GHz 的器件高速性能测试系统,其中一个主要仪器为安捷伦公司生产的 40GHz 矢量网络分析仪。提出了一种新颖的误差去除模型,以获得光探测器的本征响应,提取结果与厂家提供的测试报告吻合。另外,根据测量得到的光调制器调制曲线,将调制器设置最佳工作点,并测量其眼图以保证调制器处在最佳工作状态。利用功率扫描法精确测量了调制器的半波电压,其他的一些重要参数也被测量。

关键词 光电子学; 光调制器; 矢量网络分析仪; 误差分析模型; 功率扫描; 频响

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.011201

Research on Measurement of High Performance Optical Modulator

Yan Qiang Huang Yongqing Duan Xiaofeng Wang Wei Yan Xin Ren Xiaomin

Huang Hui Wang Qi Zhang Xia

(Institute of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Accurate measurement of the high performance photomodulator is increasing in need. A 40 GHz high-speed measurement system has been set up to accurately measure the frequency response of a 35 GHz photomodulator. The main instrument of the system is Agilent's vector network analyzer (VNA). An error eliminate model has been derived to obtain the intrinsic response of the modulator, and the result fits well to the manufacturer report. In addition, the eye diagram of the modulator is measured when the modulator is adjusted to the best work status according to the pre-measured modulator curve. And voltage of pi phase shift is measured using power sweep method. All other important parameters are also measured and analyzed.

Key words optoelectronics; optical modulator; network analyzer; error eliminate model; power sweep; frequency response

OCIS codes 120.0120; 120.3688

1 引言

高速宽带铌酸锂波导型电光强度调制器由于其高带宽、良好的稳定性、高的信噪比等优点,使得其在光纤通信和传感领域引起了广泛关注。本文详细阐述了光学强度调制器及其性能参数。由于光调制器是一个电光器件,其将射频(RF)信号调制到光信号上,使得很难直接用微波 S 参数表征其频率响应特性。所以,提出了一种理论表征光电器件的频率响应特性,此外,设计了一个误差估计模型。之前用光外差技术^[1]和相关的校准技术精确测量了光电器件的频响特性,所以能够用此误差估计模型准确地提取出电光器件的本征响应。为了将调制器设置为最佳工作状态,搭建了一个自动测试系统精确测量其调制曲线。还提出了一种新颖的功率扫描方法准确测量调制器的半波电压(V_{π})。

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-10-18

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327600)和国家 863 计划(2007AA03Z418)资助课题。

作者简介: 颜强(1986-),男,硕士研究生,主要从事光电器件方面的研究。E-mail: yanqiang23@gmail.com

导师简介: 黄永清(1963-),女,博士,教授,主要从事光纤通信系统和光电器件等方面的研究。

E-mail: yqhuang@bupt.edu.cn

2 调制器理论及性能参数

以一个 40 GHz 强度调制器为研究对象,此调制器拥有外置直流偏(DC Bias)端口,基于钛-非散射 Z 切铌酸锂材料,使用马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构。该调制器利用铌酸锂晶体的相对折射率随调制电压线性变化的特性,当光束直射进入铌酸锂波导时,随施加调制电压在输入光和输出光之间产生 $\Delta\phi$ 的相差,完成相位调制。图 1 为 MZI 型光波导强度调制器的结构示意图^[2]。输入光在左边 Y 型波导分叉处被分成两路,分割后的光束分别在 MZI 的两臂独立地传输,每一个臂有一个相位调制。然后,两个光束在右边的 Y 型波导分叉处合成一束光,这束已经携带了射频调制信号。当加在电极上的电压在两臂产生相同的相移时,输出光强将达到最大值,记此时的调制电压为 V_{on} 。相反,当加在电极上的电压在两臂产生相反的相移时,输出光强将达到最小值,记此时的调制电压为 V_{off} 。有很多参数来描述一个光调制器的性能,其中包括消光比,电光-3 dB 带宽、插损、射频口的半波电压、直流端口压、最佳偏置电压和反射参数 S_{11} 。

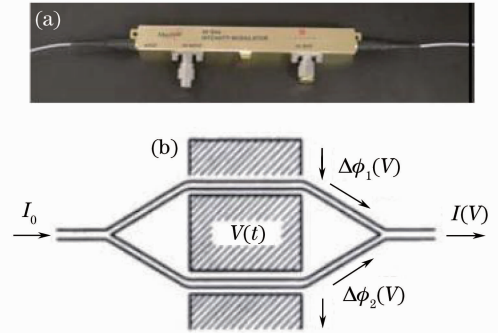


图 1 (a) Mach-40-005 40 GHz 调制器,

(b) MZ-型光波导型强度调制器

Fig. 1 (a) Mach-40-005 40GHz optical modulator,

(b) MZ-optical waveguide modulator

3 频率响应特性(S_{21})的精确测量

由于光调制器是一个电光器件,很难直接用微波 S 参数表征光调制器的频率响应特性。王松等^[3]提出了一种用光调制器出射光功率(交流分量)与射频调制信号的幅度之比来表征电光器件频率响应的方法,可表示为

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Gamma_m & 0 \\ RG & \Gamma_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

文献^[3]将电光器件和光电器件作为一个整体,所以这个整体就是一个电的器件,如此可以用微波 S 参数来表征整个器件。(1)式中, Γ_m 和 Γ_d 分别表征光调制器和光探测器电宽口的反射参数。整个电电器件的 S_{21} 参数由 R 和 G 构成,分别为光调制器和光探测器的频率响应特性。记整个电电器件的 S 参数为 S_{en} , 该参数可以用高性能矢量网络分析仪精确测量,如果 G 已经被测试得到,则 R 可以由(1)式导出。为了测量 S_{en} , 搭建了一个 40 GHz 高速性能测试系统,如图 2(a)所示。

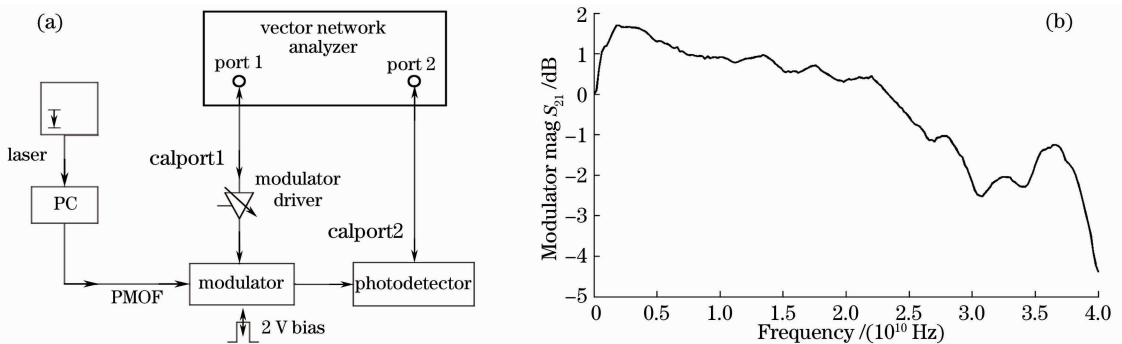


图 2 (a) 40 GHz 高速性能测试系统, (b) 去除误差后的光调制器 S_{21} 参数,其-3 dB 带宽为 34 GHz

Fig. 2 (a) 40 GHz high speed performance measurement system, (b) S_{21} parameter of optical modulator and its -3 dB bandwidth is 34 GHz

在测试过程中使用了短路开路负载和传输(SOLT)校准方法将矢量网络分析校准到图 2 所示 calport1 和 calport2 端面。调制器驱动、调制器和光探测器级联成一个电网络,这个级联网络的 S 参数被校准的矢量网络分析精确地测量了。级联网络微波参数之间的内部关系可表示为

$$S_{cas21} = (S_{A21} \times S_{B21}) / (1 - S_{A22} \times S_{B11}). \quad (2)$$

当用这个模型处理光调制器和光探测器时,网络 A 表示调制器,网络 B 表示光探测器。调制器的 2 端口和光探测器的 1 端口都是光端口,信号主要是从调制器的 2 端口传输至光探测器的 1 端口。如果光探测器的光端口镀了高性能抗反射膜,那么 $S_{modulator22}$ 和 S_{PD11} 都将非常的小,小到足以认为 $S_{cas21} \approx S_{modulator21} \times S_{PD21}$ 。

正如测试结果所显示, $S_{modulator11} \in [-10, -30]$ dB 和 $S_{modulator_driver22} \in [-10, -25]$ dB, 所以上述模型同样可以用来处理光调制器驱动和光调制器的级联网络,即 $S_{cas21} \approx S_{modulator_driver21} \times S_{modulator21}$ 。所以整个误差估计模型可表示为

$$S_{cas21} \approx S_{modulator_driver21} \times S_{modulator21} \times S_{PD21}. \quad (3)$$

调制器驱动是一个电电器件,其 S 参数 $S_{modulator_driver}$ 能用矢量网络分析直接测量得到,而光探测器的频响参数 S_{PD21} 能用光外差技术和相应的校准技术测量。上述误差估计模型处理测试结果,获得了光调制器的频响特性,如图 2(b)所示。测试结果与厂家提供的产品测试报告非常吻合。

4 调制曲线测量和分析

为将光调制器设置为最佳工作状态,需要仔细分析调制器理论和测试调制曲线。MZI 输出光束的电场可表示为^[4]

$$E(t) = E_0 \exp \left[j \left(\omega_0 t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) \right] \cos \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right), \quad (4)$$

式中 φ_1 和 φ_2 是 MZI 两臂的相移,由于这种干涉仪的推挽结构,可以假设 $\varphi_1 = -\varphi_2$,由此(4)式可以简化为

$$E(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t) \cos \varphi_1, \quad (5)$$

式中 φ_1 可表示为^[4]

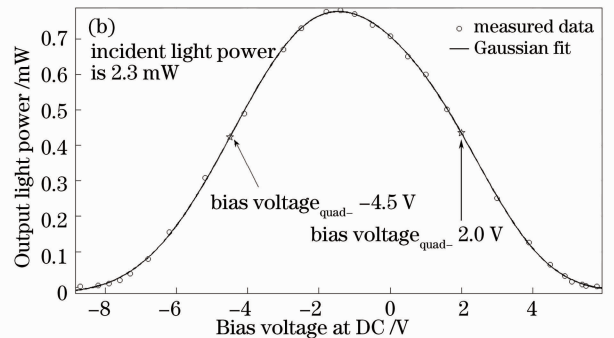
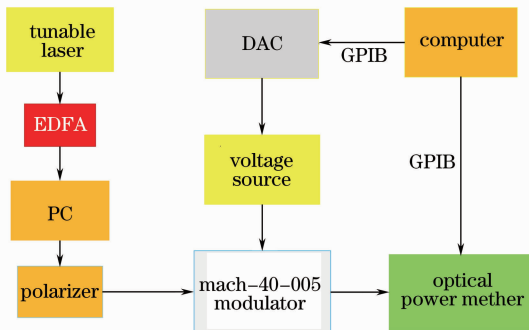
$$\varphi_1 = C \cos(\omega_m t) + \varphi_{DC}, \quad (6)$$

式中 φ_{DC} 是施加在直流端的电压所产生的相移, $C \cos(\omega_m t)$ 是射频端施加的射频信号所产生的相移。为了测量调制曲线,让 RF 端开路,用软件控制施加在 DC 端的电压,测试调制器输出的光信号强度(交流部分)。调制曲线测试系统如图 3(a)所示。图 3(b) 为测试得到的调制曲线及其拟合曲线,使用高斯拟合模型来拟合测试结果,所使用的高斯拟合模型可表示为

$$f(x) = a_1 \exp \left[- \left(\frac{x - b_1}{c_1} \right)^2 \right] + a_2 \exp \left[- \left(\frac{x - b_2}{c_2} \right)^2 \right] + a_3 \exp \left[- \left(\frac{x - b_3}{c_3} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

拟合度分析:平方误差和 SSE 为 0.0007118,原始数据和预测数据之间的相关度的平方 R-square 为 0.9997,均方根误差 RMSE 为 0.006288。

可以看出,测试结果与理论完全吻合,拟合结果可以用作进一步的分析研究,下面有些调制器的重要性能



EDFA: erbium-doped optical fiber amplifier; DAC: digital-to-analog converter; GPIB: general-purpose interface bus

图 3 (a) 调制曲线测试系统, (b) 测试得到的调制曲线及其拟合曲线

Fig. 3 (a) Measurement system of modulation curve, (b) measured modulation curve and its fitting curve

参数即可从拟合结果中间接推导出来。从图 3(b)可以得到半腰偏置电压为 -4.5 V 或 2 V , 消光比为 24.9 dB , 插损为 4.7 dB , DC 端 $V_{\text{pi}}=7.2\text{ V}$ 。

5 使用功率扫描方法测试 V_{pi}

功率扫描是离散的改变射频信号的功率,用来测试输出信号的幅度及相位的变化。功率扫描被用来表征功率敏感型电路,比如测试增益压缩点。在此,使用功率扫描方法测试调制器 RF 端的 V_{pi} ,RF 频率被设置为 20 GHz ,功率扫描范围为 $-23\sim 3\text{ dBm}$ 。测试结果如图 4(a)所示。当调制器驱动的 RF 端施加 -2.2 dBm 的射频信号时,光探测器的 RF 端的输出信号功率达到最大值 2.616 nW 。经过前面的测试,调制驱动在 20 GHz 时的增益为 23.2 dB ,可以计算得出,此时光调制器 RF 端的射频信号功率为 21 dBm ,亦即 7.1 V ,这就是说 RF 在 20 GHz 时的 $V_{\text{pi}}=7.3\text{ V}$ ^[5]。

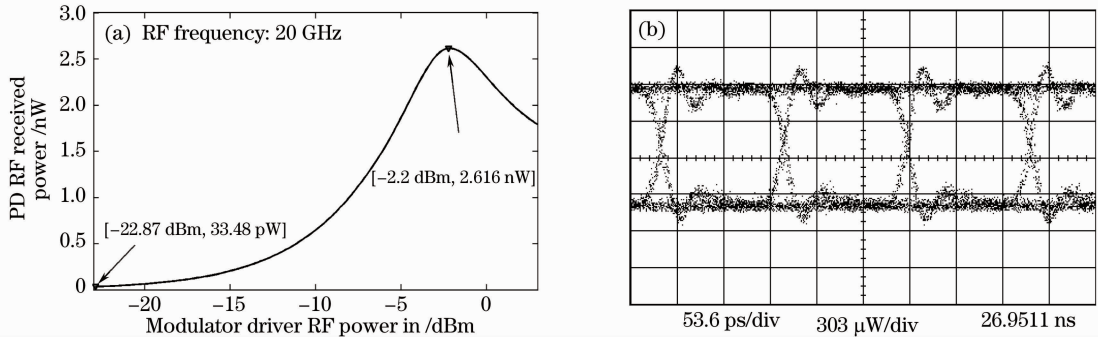


图 4 (a) 功率扫描, (b) 眼图测试

Fig. 4 (a) Power sweep and (b) eye diagram measurement

为了验证测试结果的正确性,按照上述参数设置,测试了级联网络的眼图^[6,7],测试结果如图 4(b)所示。图 4(b)显示光调制器工作在最佳位置,即偏置电压为 2 V ,调制器驱动射频端信号功率为 -5.6 dBm ,测试结果完全正确。表 1 列举了测试得到的性能参数。

表 1 调制器性能参数测试结果

Table 1 Results of some important parameters of optical modulator

Parameters	Results	Parameters	Results
Optical on/off extinction ratio /dB	24.9	RF V_{pi} at 20 GHz /V	7.1
E/O -3 dB bandwidth /GHz	35	DC V_{pi} at DC /V	7.2
Insertion loss /dB	4.7	Bias voltage _{quad-} /V	2, -4.5

6 结 论

阐述了 Z 切铌酸锂调制器的一些重要参数及调制器理论,其中大部分重要参数都得到精确的测量。基于矢量网络分析仪搭建了一个 40 GHz 频率响应测试系统,利用一种简单而新颖的误差估计模型结合已经被精确测量的光探测器的 S 参数来获取光调制频率响应特性,测试结果与厂家提供的测试报告非常吻合。调制曲线及各端口的 V_{pi} 也得到精确的测量了。基于测试得到的调制曲线,将光调制器设置为最佳工作状态,并观察了级联网络的眼图。其他的一些重要参数都可从上述测量结果中导出。

参 考 文 献

- Ning Huazhu, Ji Minwen, Hai Shengsan *et al.*. Improved optical heterodyne methods for measuring frequency responses of photodetectors[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2006, **42**(3): 241~248
- Gan Qingyun, Gao Zhihui, Wang Junkang *et al.*. Investigation and improvement of LiNbO_3 electro-optic modulator with ridge structure[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(5): 35~37
- 甘庆云, 高致慧, 万俊康 等. 脊波导结构 LiNbO_3 电光调制器研究与改进[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(5): 35~37
- Wang Song, Huang Yongqin, Ren Xiaomin *et al.*. Accurate measurement of frequency response of high-speed optical

- intensity modulator using frequency sweeping method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **38**(6): 1020~1024
- 王 松,黄永清,任晓敏 等. 扫频法精确测量高速光调制器频率响应[J]. 红外与激光工程, 2008, **38**(6): 1020~1024
- 4 H. Zhou, Z. Meng, Q. Yao *et al.*. Research on measurement of frequency shift characteristics based on LiNbO₃ waveguide electro-optic intensity modulator[C]. IEEE Optical Fiber Sensors Conference, APOS '08, 1st Asia-Pacific, 2008. 1~5
- 5 Yang Yisu, Huang Yongqing, Huang Hui *et al.*. Design of photodetector with subwavelength grating structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2352~2357
- 杨一粟,黄永清,黄 辉 等. 一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2352~2357
- 6 Duan Xiaofeng, Huang Yongqing, Wang Qi *et al.*. A wavelength selective monolithically integrated photodetector array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2362~2366
- 段晓峰,黄永清,王 琦 等. 具有多波长处理功能的单片集成光探测器阵列[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2362~2366
- 7 佳 水. 用于光网的采用电吸收调制器的 40 Gb/s 光学 3R 重生器[J]. 激光与光电子学进展, 2003, **40**(6): 16~21