

基于小信号的电光调制器半波电压测量方法

闫应星^{1,2}, 李淼淼¹, 胡红坤¹, 彭松¹, 徐臻婧²

(1. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060; 2. 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:针对马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)型电光调制器高频半波电压测量方法复杂、测量仪器昂贵、测量成本高等问题,提出了一种基于小信号的高频半波电压测量方法。该方法利用光功率计的积分特性,仅使用光源、信号发生器、直流电源及光功率计,通过测量待测器件在有射频信号输入和无射频信号输入下输出功率极值的变化,即可实现对M-Z型电光调制器高频半波电压的高精度测量。采用OptiSystem开展了测量方法的仿真验证,采用Matlab完成了测量误差分析,并在1 kHz频率下对测量方法进行了实验验证。仿真及实验结果表明:该测量方法可以仅利用小信号完成M-Z型电光调制器半波电压的准确测量,1 kHz下绝对误差小于0.5%,换算所得的1 dB压缩点在10 GHz~40 GHz频率范围内与频响曲线的相对误差小于±0.3 dB。

关键词:马赫-曾德尔干涉仪;电光调制器;半波电压;光功率计

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.021

A method of measuring half wave voltage of electro-optic modulator based on small signal

YAN Ying-xing^{1,2}, LI Miao-miao¹, HU Hong-kun¹, PENG Song¹, XU Liu-jing²

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China;

2. Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, a measurement method based on small signal is proposed to solve the problems of complex high-frequency half wave voltage measurement method and expensive instrument of M-Z electro-optic intensity modulator. By using the integral characteristics of the optical power meter and using only the light source, signal generator, DC power supply and optical power meter, the high-precision measurement of high frequency half wave voltage of M-Z electro-optic intensity modulator can be achieved by measuring the change of the extreme output power of the device with and without RF signal input. In addition, the simulation verification of the measurement method is carried out by using OptiSystem, measurement error analysis is performed with Matlab, and the measurement method is verified at 1 kHz frequency. Simulation and experimental results show that the proposed method can accurately measure the half wave voltage of M-Z electro-optic modulator only with small signal. The absolute error at 1 kHz is less than 0.5%, and the relative error is less than ±0.3 dB in the range of 10 MHz~40 GHz.

Keywords: M-Z; electro-optic modulator; half wave voltage; optical power meter

基金项目:固体激光技术重点实验室开放基金项目(No. 6142404190104)资助。

作者简介:闫应星(1966-),男,硕士,高级工程师,从事光电子器件的研制工作。

通讯作者:李淼淼(1992-),男,博士研究生,工程师,主要研究方向为铌酸锂集成光学器件。E-mail:limm.g@foxmail.com

收稿日期:2021-08-19; **修订日期:**2021-10-07

1 引言

马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, M-Z) 干涉仪是一种被广泛采用的外调制电光调制器结构,具有结构简单、频率覆盖范围宽、开关消光比高等特点,广泛应用于光纤通信和光纤传感等领域^[1-3]。半波电压是 M-Z 型电光调制器的重要参数之一,用于表征在特定频率下器件的驱动功率大小。较低频率下的半波电压可通过任意波形发生器 (AWG) 输出锯齿波驱动器件,并采集输出功率最大值及最小值对应的电压计算得到,该方法简单直观且测量精度高。但 AWG 难以产生 1 GHz 及以上频率的锯齿波,因此,对于较高频率下的半波电压,普遍采用信号发生器产生高频正弦信号并结合以下几种方法进行测量:(1) 光谱分析法,即利用光谱分析仪对比输出光谱的奇次或偶次分量强度,计算得到半波电压^[4-7]; (2) 频谱分析法,即使用探测器和频谱分析仪,对比输出频谱奇次或偶次分量强度,计算得到半波电压^[8]; (3) 1 dB 压缩点或拐点测量法,即使用探测器和频谱分析仪,测量输出信号一次谐波的 1 dB 压缩点或功率拐点,计算得到半波电压^[9]。

上述三方法都存在一定的局限性:方法(1)受光谱分析仪分辨率限制,起测频率较高,一般无法覆盖 5 GHz 及以下频率;方法(2)需要三倍测量频率的频谱分析仪,同时需要对探测器进行额外校准,测量成本高;方法(3)测量结果准确,是工程应用中测量高频半波电压的常用方法,但随着测量频率的升高,M-Z 型电光调制器 1 dB 压缩点和功率拐点也会快速上升,所需的高频、大功率信号源甚至需要固态功率放大器来产生,不仅仪器昂贵,还增加了被测器件在高功率下的损坏风险。

本文提出了一种仅使用光源、信号发生器、直流信号源及光功率计等基础仪器即可完成高频半波电压测量的方法。这种方法利用光功率计的积分特性,测量有射频信号输入和无射频信号输入情况下器件输出最大、最小光功率值,并通过计算从而实现对该频率下的半波电压的测量。该方法测量过程简单,可测频率范围广,同时所需射频信号功率远小于方法(3),利用普通信号发生器即可完成测量。

2 半波电压测量原理分析

本文提出的基于小信号的 M-Z 型电光调制器

半波电压测量系统构成框图如图 1 所示。系统由光源、待测 M-Z 型电光调制器、光功率计、信号发生器和直流电源组成。此外,还需使用微波功率计准确测量信号发生器输出的射频功率值。

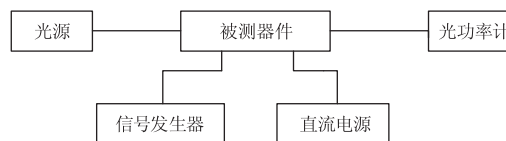


图 1 M-Z 型电光调制器半波电压测量系统框图
Fig. 1 Block diagram of half wave voltage measurement system of M-Z electro-optic modulator

设 M-Z 型电光调制器中上路光振幅为 A , 下路光振幅为 B , 波导无损耗, 推挽电极结构下, 上下两路调制效率相等, 效果相反, 同时设置电光调制器工作点在极小值点, 则上下两路光程差为 π 。输出光场 E_{out} 可以表示为:

$$\begin{aligned} E_{out} &= A \cdot \exp\left\{i\left[\omega_c t + \frac{V_{PP} \cdot \pi}{4V_\pi} \cdot \cos(\omega_c t) + \pi\right]\right\} \\ &+ B \cdot \exp\left\{i\left[\omega_c t - \frac{V_{PP} \cdot \pi}{4V_\pi} \cdot \cos(\omega_c t)\right]\right\} \\ &= \exp(i\omega_c t) \left\{ B \cdot \exp\left[-i \frac{V_{PP} \cdot \pi}{4V_\pi} \cdot \cos(\omega_c t)\right] - \right. \\ &\quad \left. A \cdot \exp\left[i \frac{V_{PP} \cdot \pi}{4V_\pi} \cdot \cos(\omega_c t)\right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ω_c 为光信号频率; V_{PP} 为信号发生器输出正弦信号的峰峰值; ω_e 为正弦信号的频率; V_π 为器件的半波电压。此时输出光功率 P_{out} 可以写为:

$$\begin{aligned} P_{out} &= E_{out} \cdot E_{out}^* \\ &= B^2 + A^2 - 2AB \left\{ \cos\left[\frac{V_{PP} \cdot \pi}{2V_\pi} \cdot \cos(\omega_c t)\right] \right\} \\ &= (A - B)^2 + 2AB \left\{ 1 - \cos\left[\frac{V_{PP} \cdot \pi}{2V_\pi} \cdot \cos(\omega_c t)\right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

当输入信号为小信号, 即 V_{PP} 趋向于 0 时, 可以认为 $\frac{V_{PP} \cdot \pi}{2V_\pi} \cdot \cos(\omega_c t)$ 也趋向于 0, 式(2)可写为:

$$\lim_{V_{PP} \rightarrow 0} (P_{out}) = (A - B)^2 + AB \left[\frac{V_{PP} \cdot \pi}{2V_\pi} \cdot \cos(\omega_c t) \right]^2 \quad (3)$$

采用光功率计测量时, 所得功率值为采样周期内的平均值, 当输入射频信号的频率远大于功率计的采样频率时, 测得的功率值 $\overline{P_{out}}$ 可近似写为:

$$\begin{aligned} \overline{P_{out}} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [\lim_{V_{pp} \rightarrow 0} (P_{out})] d(\omega_e t) \\ &= (A - B)^2 + \frac{AB}{2\pi} \cdot \left[\frac{V_{pp} \cdot \pi}{2V_{\pi}} \right]^2 \cdot \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2(\omega_e t) d(\omega_e t) \\ &= (A - B)^2 + \frac{AB}{2} \cdot \left[\frac{V_{pp} \cdot \pi}{2V_{\pi}} \right]^2 \end{aligned} \quad (4)$$

而无射频信号输入时,调制器输出的最大最小光功率 P_{max} 和 P_{min} 可以直接由式(5)表示:

$$\begin{cases} P_{max} = (A + B)^2 \\ P_{min} = (A - B)^2 \end{cases} \quad (5)$$

此时,通过对 P_{max} 、 P_{min} 和 $\overline{P_{out}}$ 进行运算,可以得到仅和输入射频信号峰峰值 V_{pp} 及待测器件半波电压 V_{π} 相关的关系式:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{out} - P_{min}}} &= \sqrt{\frac{(A + B)^2 - (A - B)^2}{(A - B)^2 + \frac{AB}{2} \cdot \left[\frac{V_{pp} \cdot \pi}{2V_{\pi}} \right]^2 - (A - B)^2}} \\ &= \frac{4\sqrt{2} \cdot V_{\pi}}{\pi \cdot V_{pp}} \end{aligned} \quad (6)$$

整理后即可得到 M-Z 型电光调制器在小信号输入的情况下,半波电压的近似计算公式:

$$V_{\pi} = \frac{\pi \cdot V_{pp}}{4\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{out} - P_{min}}} \quad (7)$$

测量过程中按图 1 搭建好测量系统,待光源稳定后,测量无射频信号输入下待测器件输出光功率的最大最小值 P_{max} 和 P_{min} (以 W 为单位),再开启信号发生器,输出待测频率下峰峰值为 V_{pp} 的射频信号,此时再测量待测器件输出光功率的最小值 $\overline{P_{out}}$,则待测器件的半波电压可通过式(7)计算得到。

为验证测量方法的准确性,用 OptiSystem 对该方法开展仿真,光路如图 2 所示,设置光源输出功率为 1 mW,信号发生器产生 $V_{pp} = 0.5$ V 的 10 GHz 信号,M-Z 型电光调制器半波电压 4 V,插入损耗 3 dB,消光比 30 dB,光功率计显示结果,为该条件下器件输出的最小光功率值。

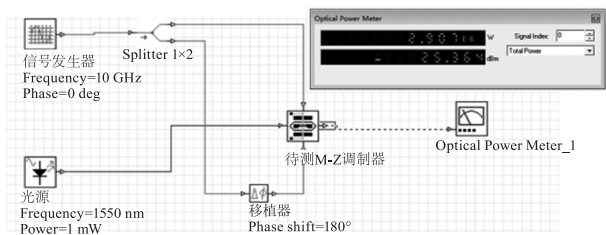


图 2 测量原理仿真光路

Fig. 2 Measurement principle simulation optical path

通过改变 M-Z 型电光调制器的偏置工作点、开关信号发生器输出,分别得到 $P_{max} = 0.5$ mW, $P_{min} = 0.0005$ mW, $\overline{P_{out}} = 0.0029$ mW,代入式(7)计算得到器件半波电压 $V_{\pi} = 4.006$ V,与设置的器件半波电压几乎一致。

3 半波电压测量误差模型构建

OptiSystem 的仿真结果与设置的 M-Z 型电光调制器半波电压存在一定偏差,主要原因是公式推导过程中使用了小信号近似,当输入信号增大时,误差会快速变大。下面将针对输入信号与测量误差之间的关系展开分析,建立半波电压测量的误差模型。

用光功率计测得的实际功率值 P_{outV} 替代小信号近似的结果 $\overline{P_{out}}$ 代入式(7)进行解算,并计算解算结果与小信号近似下计算结果间的相对测量误差:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{|\Delta V_{\pi}|}{V_{\pi}} \\ &= \frac{\pi \cdot V_{pp}}{4\sqrt{2} \cdot V_{\pi}} \cdot \left| \sqrt{\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{out} - P_{min}}} - \sqrt{\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{out} - P_{min}}} \right| \\ &= \left| \frac{\pi \cdot V_{pp}}{2\sqrt{2} \cdot V_{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2 - \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos \left[\frac{\pi \cdot V_{pp}}{2\sqrt{2} \cdot V_{\pi}} \cdot \cos(\omega_e t) \right] d(\omega_e t)}}} - 100\% \right| \end{aligned} \quad (8)$$

用 MATLAB 对相对误差 ε 进行仿真,变量为输入射频信号峰峰值相对于半波电压的大小,仿真结果如图 3 所示。

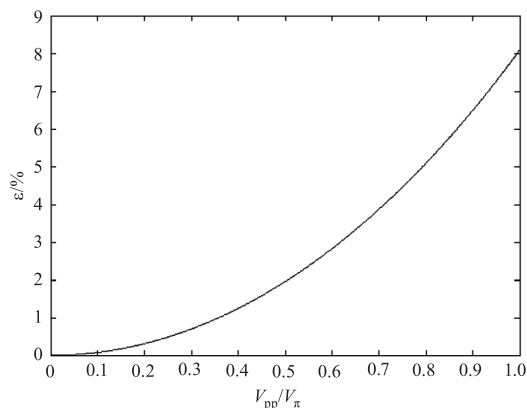


图 3 小信号近似下的相对测量误差

Fig. 3 Relative measurement error under small signal approximation

从仿真结果来看,当输入信号峰峰值 $V_{pp} \leq 0.5 V_{\pi}$ 的情况下,小信号近似所引起的误差不超过半波电压真实值的 2%,完全满足实际测量需求;同时还能看出,实际测量中,输入信号越小,测量的相对误差越低。

4 测量方法验证实验及结果

首先用常规方法对 M-Z 型电光调制器 1 kHz 下的半波电压进行测量实验,实验装置如图 4 所示。

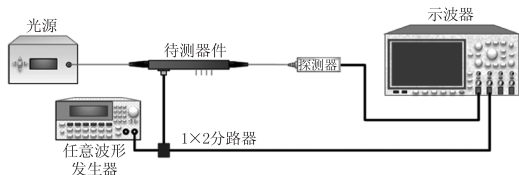


图 4 半波电压测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of half wave voltage measurement

实验所使用的光源为 1550 nm 的 DFB 光源,任意波形发生器为 KEYSIGHT 33250A,示波器为 TEK DPO5054B,待测器件为中国电科第四十四研究所生产的 15MZPF8715 型铌酸锂电光强度调制器。任意波形发生器输出 1 kHz 锯齿波,由分路器分为两路,一路进入待测器件,一路进入示波器,测量结果如图 5 所示,图中,三角函数形曲线为探测器输出信号,锯齿形曲线为任意波形发生器输出电压值。探测器输出信号由最小变到最大所对应的任意波形发生器电压变化量,即为待测器件的半波电压值 4.21 V。

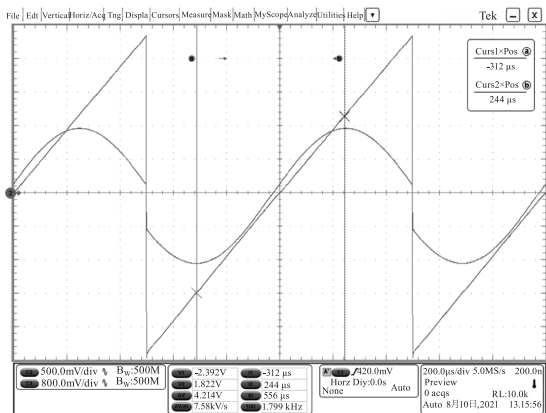


图 5 1 kHz 半波电压测量结果

Fig. 5 Measurement results of half wave voltage at 1 kHz

再用图 1 所示的方法进行测量,光功率计使用嘉慧公司生产的 JW3201N 型光功率计,输入正弦信号 $V_{PP} = 1$ V,测得的 $P_{max} = 671.6 \mu W$, $P_{min} = 0.185 \mu W$, $P_{out} = 11.77 \mu W$ 。解算得到待测器件在 1 kHz 下的半波电压为 4.23 V,与图 4 所示的标准方法测量所得绝对误差仅为 0.48 %。

5 对比实验及结果

用图 1 所示的方法在 10 MHz ~ 40 GHz 内进行半波电压测量,测量所需的高频信号由思仪 AV3672D 矢量网络分析仪产生,设置输出信号功率为 0 dBm,频率范围内共测量 201 个数据点,矢量网

络分析仪输出实际功率由思仪 AV2438SC 微波功率计读取。

由于高频下的信号强度由功率表示,计算中输入信号峰峰值 V_{PP} 由式(9)计算得到。

$$V_{PP} = \sqrt{\frac{R \cdot 8 \cdot 10^{\frac{P}{10}}}{1000}} \quad (9)$$

式中, P 为输入射频功率,单位为 dBm; R 为待测器件阻抗,由器件电极结构决定,测量所得结果如图 6 所示。

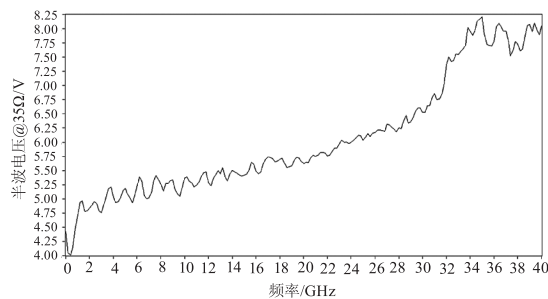


图 6 10 MHz ~ 40 GHz 半波电压测量结果

Fig. 6 Measurement results of 10 MHz ~ 40 GHz half wave voltage

为验证高频半波电压测量的准确性,我们使用光波原件分析仪测量待测器件的频率响应曲线,结果如图 7 所示。

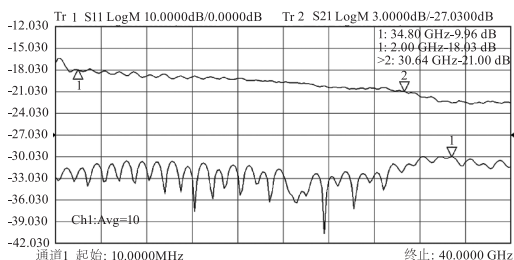


图 7 带宽测量结果

Fig. 7 Bandwidth measurement results

通过式(10)将图 6 的半波电压测量结果换算为 1 dB 压缩点,再与图 7 的频率响应曲线对比,结果如图 8 所示。

$$P_{1dB} = \frac{9 \cdot V_{PP}^2}{200 \cdot R} \quad (10)$$

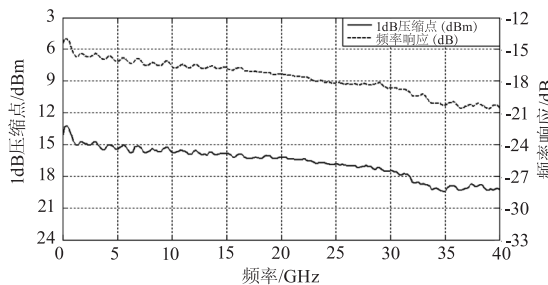


图 8 测量结果对比

Fig. 8 Comparison of measurement results

可以看到被测器件的 1 dB 压缩点从 15 dBm 左右随频率升高逐渐增大至 19 dBm, 与光波原件分析仪测得的频率响应曲线在趋势上具有较高的一致性。图 9 为两条曲线之间的相对差值。

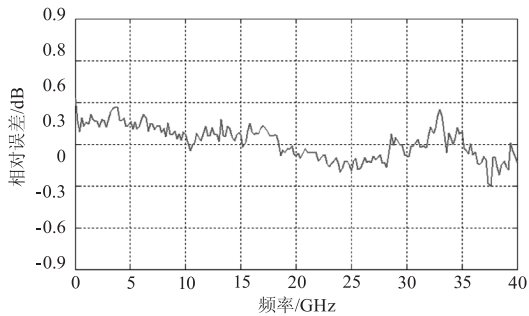


图 9 1 dB 压缩点与频响曲线相对差值

Fig. 9 Relative difference between 1 dB

compression point and frequency response curve

由图 9 可以看出, 测量所得的 1 dB 压缩点与频率响应曲线在 10 MHz ~ 40 GHz 内的相对误差小于 ± 0.3 dB, 说明本文所述方法在高频下同样拥有较高的测量准确性。相较于 1 kHz 下 0.48% 的绝对测量误差, 增长的误差应该源于微波功率计的测量不确定度及信号源、微波功率计和待测器件之间的阻抗失配。

6 结论

本文提出了一种基于小信号的 M-Z 型电光调制器高频半波电压测量方法, 仅使用光源、信号发生器、直流电源及光功率计即可完成宽频范围下的高精度半波电压测量; 相较于光谱法, 该方法解决了频率覆盖范围的问题, 相较于频谱法和压缩点测量法, 提升了测量精度并且大幅降低测量成本。仿真结果显示, 输入射频信号 $V_{pp} \leq 0.5V_{\pi}$ 的情况下, 测量误差小于 2%; 实验结果表明, 在 1 kHz 下半波电压测量的绝对误差仅为 0.48%, 10 MHz ~ 40 GHz 频率范围内, 测量所得的 1 dB 压缩点相对误差小于 ± 0.3 dB。综上, 该方法为 M-Z 型电光调制器高频半波电压测量提供了一种简单的高精度、低成本解决方案。

参考文献:

- [1] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. Nature, 2018, 562(7725): 101 - 104.
- [2] Rao A, Fathpour S. Compact lithium niobate electrooptic modulators[J]. IEEE J. of Selected Top. in Quantum Electron., 2017, (99): 1 - 1.
- [3] Qi Y, Li Y. Integrated lithium niobate photonics[J]. Nanophotonics, 2020, 9(6): 1287 - 1320.
- [4] Oikawa S, Kawanishi T, Izutsu M. Measurement of chirp parameters and halfwave voltages of Mach-Zehnder-type optical modulators by using a small signal operation[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2003, 15(5): 682 - 684.
- [5] Courjal N, Dudley J M, Porte H. Extinction-ratio-independent method for chirp measurements of Mach-Zehnder modulators. [J]. Optics Express, 2004, 12(3): 442.
- [6] Jia Yupeng, Wang Dayong, Zhong Xin, et al. Half wave voltage measurement of intensity modulator based on spectral analysis[J]. J. of Beijing Institute of Technol., 2015, 41(12): 135 - 139. (in Chinese)
贾喻鹏, 王大勇, 钟欣, 等. 基于光谱分析的强度调制器半波电压测量[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(12): 135 - 139.
- [7] Xi C, Chandrasekhar S, Raybon G, et al. Characterization of electro-optic bandwidth of ultra-high speed modulators [C]//Optical Fiber Communication Conference, 2017.
- [8] Wu X M, Man J W, Xie L, et al. Novel method for frequency response measurement of optoelectronic devices [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(7): 575 - 577.
- [9] Yan, Qiang, et al. Research on measurement of high performance optical modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 91 - 95. (in Chinese)
颜强, 黄永清, 段晓峰, 等. 高性能光调制器性能测试研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(1): 91 - 95.