

基于双音外差的电光相位调制器半波电压自校准测量方法

王恒 张尚剑 邹新海 刘俊伟 张雅丽 李和平 刘永

Two-tone optical heterodyning method for the self-calibrated measurement of half-wave voltage of electrooptic phase modulator

Wang Heng Zhang Shang-Jian Zou Xin-Hai Liu Jun-Wei Zhang Ya-Li Li He-Ping Liu Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 124211 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124211

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124211>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硅基光子集成研究进展

Research progress of silicon-based photonic integration

物理学报.2014, 63(10): 104218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104218>

晶体的双参量调制及其应用

Crystals modulated by two parameters and their applications

物理学报.2014, 63(7): 074207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074207>

基于 Add-drop 型微环谐振腔的硅基高速电光调制器设计

Design of a high-speed silicon electro-optical modulator based on an add-drop micro-ring resonator

物理学报.2013, 62(19): 194210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194210>

基于 Franz-Keldysh 效应的倏逝波锗硅电吸收调制器设计

Design of an evanescent-coupled GeSi electro-absorption modulator based on Franz-Keldysh effect

物理学报.2013, 62(11): 114208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114208>

基于热膨胀效应的可调光功率分束器设计

Design of tunable optical power splitter based on thermal expansion effect

物理学报.2013, 62(2): 024218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024218>

基于双音外差的电光相位调制器半波电压 自校准测量方法*

王恒 张尚剑[†] 邹新海 刘俊伟 张雅丽 李和平 刘永

(电子科技大学光电信息学院, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

(2014年10月21日收到; 2014年12月18日收到修改稿)

电光相位调制器是光纤通信系统、微波光子系统和相干光通信系统中的关键器件之一。作为器件本征参数, 电光相位调制器的半波电压通常利用光谱方法和电谱方法进行测量。光谱方法受到光源线宽和光谱仪分辨率限制, 测量的分辨率较低; 电谱方法则需要光电检测之前将相位调制转换成强度调制, 电谱方法的主要困难在于需要对探测器的不平坦响应进行额外校准。提出了利用双音外差实现电光相位调制器半波电压自校准测量新方法, 该方法利用双音电光相位调制的边带与移频光载波的外差拍频, 对外差拍频信号进行频谱分析, 获得电光相位调制器的半波电压; 通过设定双音调制信号的频率关系, 克服了探测器光电转换中的不平坦频率响应, 实现了自校准测量。该方法可扩展探测器和频谱仪的测试频率两倍以上, 节省至少一半的带宽需求。与光谱测量方法相比, 该方法测试分辨率大幅提高且避免了光源线宽的影响; 与传统电域测量方法相比, 该方法无需额外校准, 无驱动功率和工作波长限制, 且对测试仪器带宽需求降低一半以上。实验证实了所提方法获得的电光相位调制器半波电压的测量结果与光谱分析法获得的结果一致, 且大幅度地提高了测量范围和分辨率。该方法提供了非常简单的电光相位调制器微波特性化分析方法, 对其他光电子器件分析也提供了参考。

关键词: 电光相位调制, 双音调制, 光外差, 半波电压

PACS: 42.79.Hp, 07.57.Pt, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.64.124211

1 引言

电光相位调制器具有无需偏置和线性调制的优点, 是高速光纤通信、相干光通信系统、微波光子系统中的典型光电子器件^[1-3]。半波电压作为电光相位调制器的本征参数, 直接影响电光相位调制系统的性能指标。众所周知, 由于微波光波的相速失配以及微波阻抗失配, 导致电光调制的半波电压随着工作频率升高, 使得调制特性劣化^[4]。因此, 亟需要精确、快速的微波特性测试方法指导和验证电光相位调制器的优化设计。

目前, 光谱分析法(optical spectrum analysis

method) 测试过程最为简单, 该方法通过相位调制光信号的载波与边带之间的比值, 对半波电压进行求解, 但是由于商用光栅光谱分析仪波长分辨率仅为0.01 nm左右, 在1550 nm工作波长的频率分辨率约为1.2 GHz^[5,6]。近些年, 基于布里渊或者外差技术的高分辨率光谱仪分辨率可达到几十兆赫兹, 但是这些光谱仪只能工作在1550 nm波段。另外, 光谱分析的共同弊病来源于其无法剔除激光器光源的线宽影响。因此, 高分辨率的测试方法不得不借助电域分析。不过, 由于相位调制信号不能直接被光电探测器检测^[7], 电域测量需要先将相位调制信号转换为强度调制信号, 再进行光电检测和频谱分析测试。目前, 将相位调制信号转换为强度调

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB301705, 2012CB315702)、国家自然科学基金(批准号: 61377037, 61421002, 61378028)、四川省青年基金(批准号: 2013JQ0026)、教育部新世纪人才支持计划(批准号: NCET-11-0069)和信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)开放基金资助的课题。

[†] 通信作者。E-mail: sjzhang@uestc.edu.cn

制信号的方法有干涉仪法^[8,9]、光滤波法^[10,11]、色散法^[12-14]。干涉仪法利用 Mach-Zehnder 干涉仪或者 Sagnac 干涉仪进行相位到强度的转换,但由于转换过程中干涉仪的传输函数为正弦/余弦函数,无法保证线性转换^[8]。光滤波法则是引入滤波器,对光调制信号的边带进行滤波鉴频,但由于滤波器的幅频响应具有非线性,导致测量精度受限。色散法则是利用色散介质构造具有常数幅频响应的相位滤波器,实现相位调制到强度调制转换;由于色散与调制频率的平方成正比,在低频段,色散效应导致的相位调制到强度调制转换作用不明显,使得低频段信号信噪比较差,影响测量精度^[13]。目前,电域测量存在的共同困难是测量中光电探测器的频率响应需要额外的校准,且校准过程比较繁杂^[15-17]。

本文提出基于双音外差测量电光相位调制器半波电压的电域测量新方法。该方法借助于由电光相位调制的双音调制边带与移频光载波的外差拍频,对电光相位调制器的半波电压进行测量,并通过设定双音调制频率关系消除了光电转换中的不平坦频率响应,获得了自校准电域测量。特别是该方法可以将测试频率扩展到光电探测器和频谱分析仪带宽的两倍以上,大幅降低了探测器和频谱仪的带宽需求。实验中,将本文方法与传统光谱分析方法进行对比,以验证本文提出的自校准测量方法的正确性。

2 基本原理

本文测试方法的原理如图 1 所示。激光器输出的连续光载波由光功分器一分为二,形成两支,其

中一支光载波经由偏振控制器在电光相位调制器里被双音正弦信号所调制,相位调制后的输出光信号可表示为^[15]

$$E_m = A_1 \exp j \left[2\pi f_0 t + \frac{\pi V_1}{V_{\pi 1}} \sin(2\pi f_1 t + \theta_1) + \frac{\pi V_2}{V_{\pi 2}} \sin(2\pi f_2 t + \theta_2) + \varphi_1 \right], \quad (1)$$

其中, A_1 , f_0 和 φ_1 分别为该分支的光载波的振幅、频率和初始相位; V_1 , V_2 , f_1 , f_2 以及 θ_1 , θ_2 为双音信号的幅度、频率和初相位; $V_{\pi 1}$ 和 $V_{\pi 2}$ 为相位调制器在频率 f_1 和 f_2 的半波电压。

同一连续光载波经光功分器的另一分支,由声光移频器对光载波进行移频,移频后的光场为

$$E_f = A_2 \exp j (2\pi f_0 t + 2\pi f_s t + \varphi_2), \quad (2)$$

其中, A_2 , φ_2 是该分支光载波信号的振幅和初始相位; f_s 为声光移频的频率。相位调制光信号与移频光载波由光耦合器合路输出,合成光场表示为

$$E = E_m + E_f. \quad (3)$$

该光信号输入到探测器进行光电转换,形成的光电流输出:

$$i(t) = R \cdot EE^* = R \left[A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \left(\frac{\pi V_1}{V_{\pi 1}} \sin(2\pi f_1 t + \theta_1) + \frac{\pi V_2}{V_{\pi 2}} \sin(2\pi f_2 t + \theta_2) - 2\pi f_s t + \varphi_1 - \varphi_2 \right) \right], \quad (4)$$

式中 R 为探测器频响。将 (4) 式用贝塞尔函数展开并化简得到^[18]

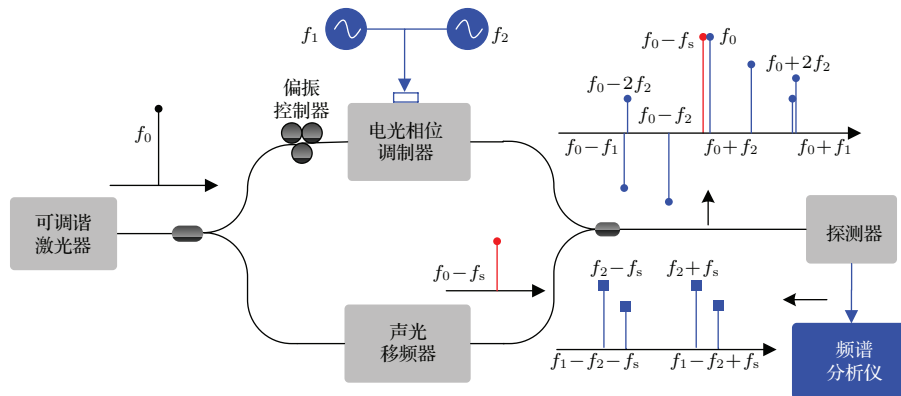


图 1 双音外差测量原理图

Fig. 1. Schematic diagram of the two-tone optical heterodyning method.

$$i(t) = R \left\{ A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \sum_{p=-\infty}^{+\infty} \sum_{q=-\infty}^{+\infty} J_p \left(\frac{\pi V_1}{V_{\pi 1}} \right) J_q \left(\frac{\pi V_2}{V_{\pi 2}} \right) \times \cos[2\pi(pf_1t + qf_2t - f_s t) + \theta_1 + \theta_2 + \varphi_1 - \varphi_2] \right\}, \quad (5)$$

其中 $J_p(x)$ 与 $J_q(x)$ 为第一类贝塞尔函数. 从(5)式可以看出, 双音外差拍频获得的电信号的频谱中包含了 $pf_1 + qf_2 - f_s$ 频率成分, 其幅值由 $J_p(\pi V_1/V_{\pi 1})J_q(\pi V_2/V_{\pi 2})$ 和频响 $R(f)$ 决定, 分别取 $p = 1, q = -1$ 和 $p = 0, q = 1$, 则有

$$i(f_1 - f_2 \pm f_s) = 2A_1A_2J_1 \left(\frac{\pi V_1}{V_{\pi 1}} \right) J_1 \left(\frac{\pi V_2}{V_{\pi 2}} \right) R(f_1 - f_2 \pm f_s), \quad (6)$$

$$i(f_2 \pm f_s) = 2A_1A_2J_0 \left(\frac{\pi V_1}{V_{\pi 1}} \right) J_1 \left(\frac{\pi V_2}{V_{\pi 2}} \right) R(f_2 \pm f_s). \quad (7)$$

并令 $f_1 \approx 2f_2$, 此时有 $R(f_1 - f_2 \pm f_s) \approx R(f_2 \pm f_s)$. 将(6)和(7)式相除, 则得

$$\begin{aligned} & \frac{H(f_1, V_{\pi 1})}{i(f_1 - f_2 \pm f_s)} \\ &= \frac{i(f_1 - f_2 \pm f_s)}{i(f_2 \pm f_s)} \\ &= \frac{J_1 \left(\frac{\pi V_1}{V_{\pi 1}} \right) J_1 \left(\frac{\pi V_2}{V_{\pi 2}} \right)}{J_0 \left(\frac{\pi V_1}{V_{\pi 1}} \right) J_1 \left(\frac{\pi V_2}{V_{\pi 2}} \right)} = \frac{J_1 \left(\frac{\pi V_1}{V_{\pi 1}} \right)}{J_0 \left(\frac{\pi V_1}{V_{\pi 1}} \right)}. \quad (8) \end{aligned}$$

也就是说, 通过测量双音外差拍频信号中的 $f_1 - f_2 \pm f_s$ 与 $f_2 \pm f_s$ 的幅度, 在已知驱动幅度情况下, 反向求解(8)式可得到电光相位调制器在调制频率 f_1 的半波电压 $V_{\pi 1}$. 由于电光相位调制器上加载的双音调制信号满足 $f_1 \approx 2f_2$ 的频率关系, 使得测量过程中探测器的频率响应被消除, 实现了自校准测量. 同时, 电谱分析中的 $f_1 - f_2 \pm f_s$ 与 $f_2 \pm f_s$ 均约为待测调制频率 f_1 的一半, 因此节省了一半的探测器和频谱仪的带宽.

3 实验验证

我们对电光相位调制器进行了测试验证, 实验中光源的波长为 1550.13 nm, 光源输出的光载波通过一个 50/50 的光功分器分为两个光束, 其中一

束经过偏振控制器后, 进入待测电光相位调制器 (COVEGA 10053), 调制器上的双音调制信号由两个微波源 (R&S SMB 100A, HP 86320A) 经微波合路器 (HP 11667A) 后得到. 另一路光载波信号则通过声光移频器 (CETC F-YSG70) 移频 70 MHz 后与之前的光相位调制信号合路, 进入到光电探测器 (HP 11982A) 进行光电转换, 探测器输出的电信号送入频谱分析仪 (R&S FSU50) 进行分析处理. 为了方便后续与光谱分析法做对比, 合路之前的光相位调制信号通过 95/5 的耦合器分出 5% 输入到光谱分析仪 (YOKOGAWA AQ6370C) 中进行光谱分析. 实验系统中光纤光路连接均采用 APC 接头以减少光路的残余反射.

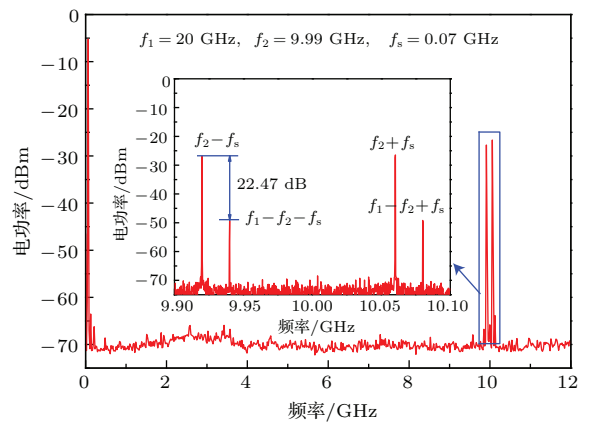


图2 典型双音外差拍频的电信号频谱图. 测试条件为 $f_1 = 20$ GHz, $f_2 = 9.99$ GHz, $f_s = 0.07$ GHz

Fig. 2. Typical electrical spectrum of the two-tone optical heterodyning in the case of $f_1 = 20$ GHz, $f_2 = 9.99$ GHz, $f_s = 0.07$ GHz.

图2给出了 $f_1 = 20$ GHz, $f_2 = 9.99$ GHz, $f_s = 0.07$ GHz 时的双音外差拍频得到的电信号频谱图, 由于调制边带和移频边带均来自同一光载波, 两个光外差信号拍频的谱线极窄. 从拍频信号的频谱图中可以得到4个需要的频率成分: $f_2 - f_s$ (9.92 GHz), $f_1 - f_2 - f_s$ (9.94 GHz), $f_2 + f_s$ (10.06 GHz), $f_1 - f_2 + f_s$ (10.08 GHz), 本文取 $f_2 - f_s$ (9.92 GHz) 和 $f_1 - f_2 - f_s$ (9.94 GHz) 的功率值分别为 -26.85 和 -49.32 dBm, 则两外差信号的功率之比为 -22.47 dB, 频谱分析仪测得双音微波信号中 $f_1 = 20$ GHz 的正弦调制信号的驱动幅度 $V_1 = 0.33$ V, 将值代入(8)式, 求解有关函数 $J_1(\pi V_1/V_{\pi 1})/J_0(\pi V_1/V_{\pi 1})$ 的方程, 反算出相位调制器在调制频率 $f_1 = 20$ GHz 时的半波电压 $V_{\pi 1} = 6.9$ V. 需要指出的是, 本文方法测出的 f_1 (20 GHz) 半波电压是利用从频率为 $f_2 \pm f_s$

(10.06 GHz, 9.92 GHz) 和 $f_1 - f_2 \pm f_s$ (10.08 GHz, 9.94 GHz) 的谱线中获得的, 这些频率成分约为所测频率 f_1 的一半, 因此该方法节约了探测器和频谱仪一半的带宽需求, 大大扩展了测试仪器的带宽.

图 3 为双音外差的频谱图与对应的光谱图. 其中, 图 3(a) 的驱动条件为 $f_1 = 8$ GHz, $f_2 = 3.99$ GHz, $f_s = 0.07$ GHz, 拍频信号的频率成分 $f_1 - f_2 - f_s$ (4.92 GHz) 和 $f_2 - f_s$ (4.98 GHz) 之间的功率之差为 16.96 dB, 图 3(b) 中调制频率为 $f_1 = 8$ GHz 时的一阶边带与光载波的功率之差为 16.82 dB, 两者的差别仅仅为 0.14 dB. 需要指

出的是, 由于光谱仪的分辨率较低, 双音调制边带在光谱上无法同时分辨, 为了保证光谱和频谱的测试条件相同, 光谱测量时, 所有仪器设备和实验系统不变, 仅仅将双音调制信号中 f_1 的频率成分保留、 f_2 频率成分关闭. 图 3(c) 是 $f_1 = 12$ GHz, $f_2 = 5.99$ GHz, $f_s = 0.07$ GHz 条件下的频谱图, 图 3(d) 是同一条件下 $f_1 = 12$ GHz 的光谱图, 频谱中的目标频率成分之比与光谱中的边带载波之比完全符合. 可见, 本文测量方法实际上提供了一种等效光谱测试方法, 由于是频谱测量, 分辨率大幅提高.

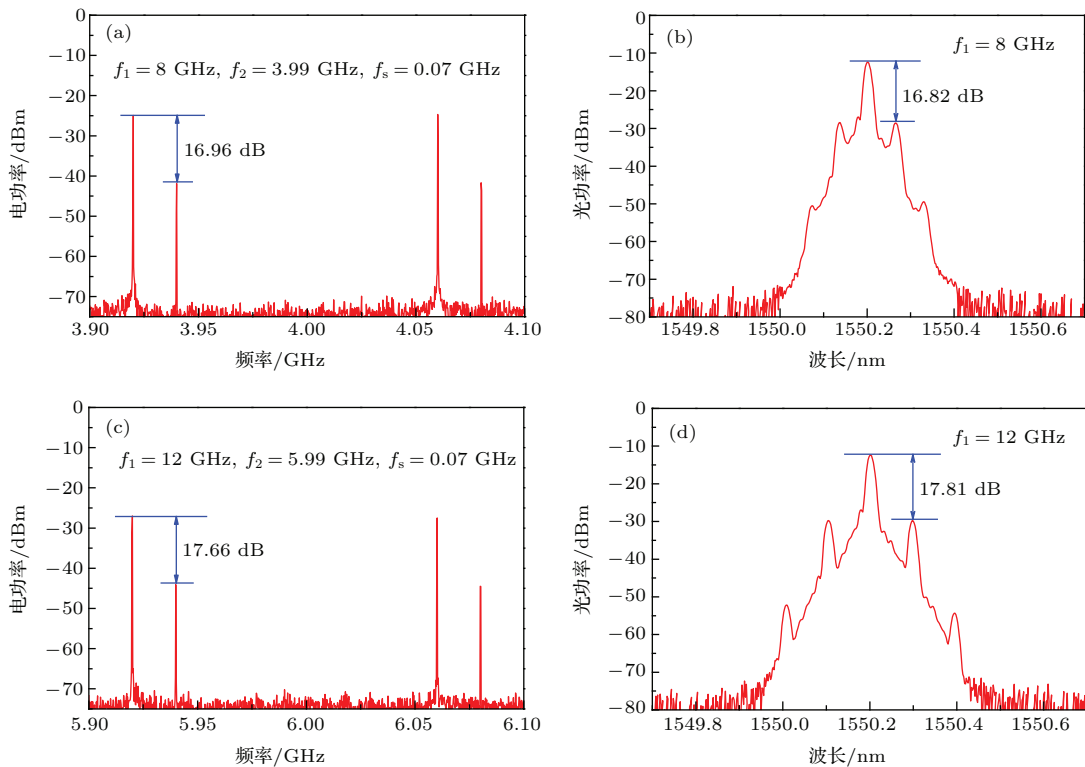


图 3 频谱分析法与光谱分析的结果对比 (a), (b) $f_1 = 8$ GHz 时的频谱图和光谱图; (c), (d) $f_1 = 12$ GHz 时的频谱图和光谱图

Fig. 3. Measured electrical spectrum with our method and the corresponding optical spectrum obtained by optical spectrum analysis: (a), (b) show the electrical spectrum and optical spectrum in the case of $f_1 = 8$ GHz; (c), (d) show the electrical spectrum and optical spectrum in the case of $f_1 = 12$ GHz.

改变双音调制信号的频率 f_1 和 f_2 同时保持 $f_1 - 2f_2 = 10$ MHz 的关系, 可以获得不同调制频率下的半波电压. 图 4 给出了本文方法与光谱分析法测量同一只光电相位调制器半波电压的实验结果, 图中也给出了微波信号幅度 V_1 随着频率 f_1 变化的曲线作为参考. 从图 4 可以看出, 在 20 GHz 的频率范围内, 本文方法的测量结果与光谱分析的结果符合得很好. 由于光谱分析仪分辨率的限制, 测量

的最小频率只能从 4 GHz 开始^[5], 而本文方法摆脱了这一限制, 大幅提高了测试分辨率. 两种测量结果相互符合验证了本文方法的正确性和可行性, 并且说明本文方法确实实现了自校准测量, 因为光谱分析中无需探测器光电转换, 即不存在探测器的频响误差问题. 另外, 本文方法与其他电域测量方法相比, 可以适用于任何驱动幅度下的测量, 避免了小信号调制条件, 最重要的是对光电探测器的频率

响应进行自校准. 为了说明本文方法实现了自校准测量, 图 5 给出了实验所用光电探测器频率响应曲线. 从图 5 可以看出, 光电探测器在 0—20 GHz 时的不平坦响应程度, 相差约为 10 dB. 以文献 [14] 中的色散辅助电域测量方法为例, 光电探测器 1 dB 的不平坦响应度, 将会引入 6.59% 的误差 [14]. 因此, 传统电域测量方法必须对光电探测器的响应进行额外精确校准, 否则会对测量结果引入较大误差甚至错误. 而本文方法对光电探测器的不平坦频率响应进行了自校准, 不受探测器频率响应波动的影响, 从而得到了电光相位调制器的半波电压准确结果.

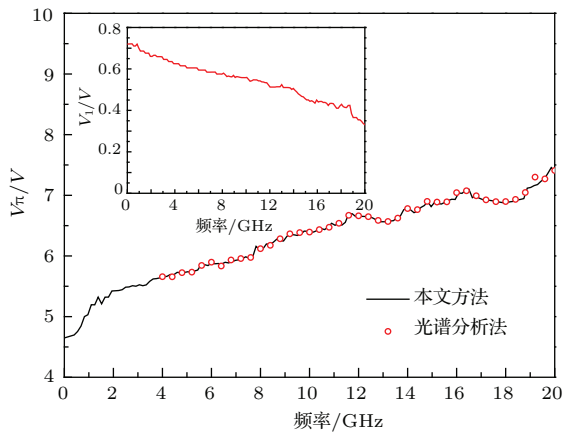


图 4 本文方法与光谱分析法的实验结果对比, 内插图为不同微波频率下的微波驱动幅度 V_1

Fig. 4. Measured half-wave voltages as a function of modulation frequency with our method and the optical spectrum analysis. Inset shows the electrical driving amplitude V_1 as a function of modulation frequency.

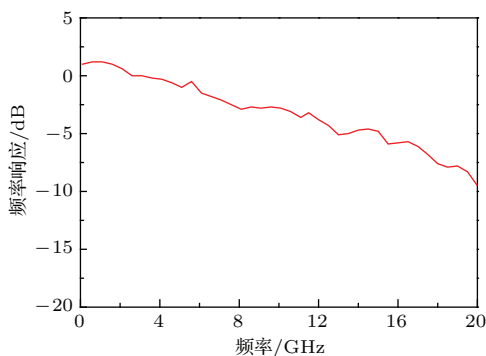


图 5 实验中光电探测器 (HP 11982 A) 的频率响应曲线

Fig. 5. Frequency responses of the photodetector (HP 11982 A) in the experiment.

为进一步讨论本文方法的精度, 我们对实验方法进行了误差分析. 相位调制器测量主要有两大误差来源, 其一是频谱仪测量 H 时的不确定度, 其二是频谱仪测量微波驱动幅度 V_1 的不确定度, 三者

之间的关系为

$$\frac{\delta V_{\pi 1}}{V_{\pi 1}} = F \frac{\delta H}{H} + \frac{\delta V_1}{V_1}, \quad (9)$$

其中, F 由 (8) 式全微分得到, 代表误差传递因子, 表示为

$$F = \frac{\delta(V_1\pi/V_{\pi 1}) / (V_1\pi/V_{\pi 1})}{\delta H/H} = \frac{V_1\pi}{V_{\pi 1}} \times \left(\frac{J_2(V_1\pi/V_{\pi 1}) - J_0(V_1\pi/V_{\pi 1})}{2J_1(V_1\pi/V_{\pi 1})} - \frac{J_1(V_1\pi/V_{\pi 1})}{J_0(V_1\pi/V_{\pi 1})} \right)^{-1}. \quad (10)$$

如图 6 所示, F 在 $V_1\pi/V_{\pi 1}$ 的整个取值范围内都小于 1. 外差拍频信号 H 的不确定度又有两部分贡献, 一部分来源于本文方法的假设 $R(f_1 - f_2 - f_s) \approx R(f_2 - f_s)$, 事实上, $f_1 - f_2 - f_s$ 和 $f_2 - f_s$ 的频率差异为 10 MHz, 根据光电探测器数据手册, 在频率差值为 10 MHz 时, 探测器频响波动小于 0.15 dB; 另一部分来源于频谱测量本身的不确定度, 根据频谱分析仪技术手册, 频谱仪的单次测量的功率不确定度小于 0.1 dB, 因此 H 测量的不确定度为 0.35 dB ($= 0.15 + 0.1 \times 2$), 传递的测量不确定度则小于 4.11% ($= (10^{0.35/20} - 1) \times 100\%$). 同样, 根据频谱仪单次测量功率不确定度 0.1 dB, 可知频谱分析仪测量 V_1 的不确定度小于 1.16% ($= (10^{0.1/20} - 1) \times 100\%$). 因此, 调制器半波电压测量的最差不确定度为 5.27% ($= 4.11\% + 1.16\%$).

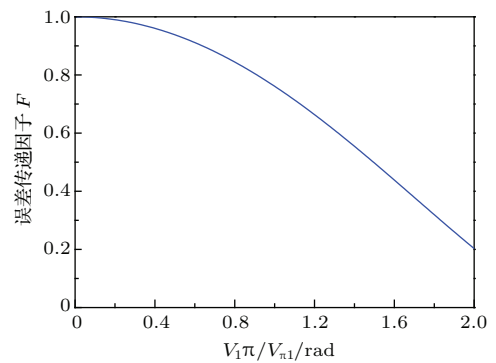


图 6 误差传递因子 F 与 $V_1\pi/V_{\pi 1}$ 的关系图

Fig. 6. Error transfer factors F as a function of $V_1\pi/V_{\pi 1}$

4 结 论

本文提出了利用双音外差实现电光相位调制器半波电压自校准测量新方法, 该方法通过双音调制边带与移频光载波的外差拍频, 实现了电光相位调制器半波电压的自校准电域测量, 有效避免了传

统电域测量方法中探测器不平坦频响需要额外校准的麻烦. 与传统光谱测量方法相比, 本文方法的测试分辨率大幅提高; 与现有电域测量方法相比, 本文方法没有小信号工作条件的限制, 对测试中的驱动幅度没有要求, 最重要的是其无需额外校准且对测试仪器带宽需求降低了一半.

综上所述, 本文提出的基于双音外差的电光相位调制半波电压测量方法实现了光电探测器不平坦频响的自校准消除, 从而很好地将光域测量变换到电域测量, 为解决光电子器件高分辨率精细测试中的共性问题提供了有益参考.

参考文献

- [1] Yao J P 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 314
- [2] Li W, Wang L X, Zheng J Y, Li M, Zhu N H 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 1875
- [3] Pagán V R, Haas B M, Murphy T E 2011 *Opt. Express* **19** 883
- [4] Liao Y, Zhou H J, Meng Z 2009 *Opt. Lett.* **34** 1822
- [5] Shi Y Q, Yan L S, Willner A E 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 2358
- [6] Oikawa S, Kawanishi T, Izutsu M 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 682
- [7] Huo W J, Xie H Y, Liang S, Zhang W R, Jiang Z Y, Chen X, Lu D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 228501 (in Chinese) [霍文娟, 谢红云, 梁松, 张万荣, 江之韵, 陈翔, 鲁东 2013 物理学报 **62** 228501]
- [8] Chan E H W, Minasian R A 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 2882
- [9] Hauden J, Porte H 2011 *International Topical Meeting on & Microwave Photonics Conference MWP/APMP Singapore, October 18–21, 2011* p161
- [10] Du J, Zhao W J, Qu Y C, Chen Z L, Geng L J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 184206 (in Chinese) [杜军, 赵卫疆, 曲彦臣, 陈振雷, 耿利杰 2013 物理学报 **62** 184206]
- [11] Chtcherbakov A A, Kisch R J, Bull J D, Jaeger N A F 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 18
- [12] Chi H, Zou X H, Yao J P 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 511
- [13] Zhang S J, Zhang X X, Liu Y 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 084217
- [14] Zhang S J, Zhang X X, Liu S, Liu Y 2012 *Opt. Commun.* **285** 5089
- [15] Zhang S J, Wang H, Zou X H, Zhang Y L, Lu R G, Liu Y 2014 *Opt. Lett.* **39** 3504
- [16] Zhang S J, Wang H, Zou X H, Zhang Y L, Lu R G, Liu Y 2014 *IEEE Photon. J.* **6** 5501008
- [17] Ye Q Y, Yang C, Chong Y H 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 29
- [18] Yu Y, Xu E M, Dong J J, Zhou L N, Li X, Zhang X L 2010 *Opt. Express* **18** 25271

Two-tone optical heterodyning method for the self-calibrated measurement of half-wave voltage of electrooptic phase modulator*

Wang Heng Zhang Shang-Jian[†] Zou Xin-Hai Liu Jun-Wei Zhang Ya-Li
Li He-Ping Liu Yong

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 21 October 2014; revised manuscript received 18 December 2014)

Abstract

High speed electrooptic phase modulators play very important roles in the high-speed optical fiber communication system, microwave photonic system, and coherent optical communication system, due to their advantages of bias voltage free and linear modulation. As an intrinsic parameter, the half-wave voltage of an electrooptic phase modulator has been characterized by using an electrical spectrum method and an optical spectrum method in the last two decades. The optical spectrum method is generally limited by the line-width of the laser source and the resolution of the available optical spectrum analyzer, while the electrical spectrum method requires the conversion from phase modulation to intensity modulation before photodetection, since a phase modulator generates a phase modulated optical signal with constant envelope. The major difficulty in the electrical spectrum method lies in the extra calibration for the responsivity fluctuation in the photodetection. In this paper, a novel self-calibrated measurement of half-wave voltage of electrooptic phase modulators is carried out based on the optical heterodyning between the two-tone phase modulated sidebands and the frequency-shifted carrier. The method achieves a self-calibration measurement, and avoids the effect of the responsivity fluctuation in the photodetection by setting a specific frequency relationship between the two-tone microwave signals. Moreover, it extends the measuring frequency range to the double bandwidth of photodetection and spectrum analysis. Compared with the optical spectrum method, the proposed method achieves very high frequency resolution measurement, and simultaneously avoids the line-width influence of laser source by use of two-tone heterodyning. Compared with the traditional electrical spectrum method, our method works under no small-signal assumption nor photodetection calibration, and eliminates the limits of electrical driving amplitude and operating wavelength. Moreover, it decreases by at least half bandwidth requirement for the photodetector and spectrum analyzer. Our experimental demonstration shows that the measured half-wave voltages of the electrooptic phase modulator obtained by our method agree well with the data measured by the optical spectrum method, and the two-tone heterodyning method greatly improves the measurement range and frequency resolution. The proposed measurement method provides a very simple analysis method for the microwave characterization of high-speed electrooptic phase modulators, which is also a reference for other optoelectronic devices.

Keywords: electrooptic phase modulation, two-tone modulation, optical heterodyning, half-wave voltage

PACS: 42.79.Hp, 07.57.Pt, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.64.124211

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CB301705, 2012CB315702), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61377037, 61421002, 61378028), the Science Foundation for Youths of Sichuan Province, China (Grant No. 2013JQ0026), the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-11-0069), and the Open Fund of State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications (Beijing University of Posts and Telecommunications), China.

[†] Corresponding author. E-mail: sjzhang@uestc.edu.cn