

一种基于调制相位的 IQ 调制器快速精确定标方法

吕晋阳, 周鹏威*, 何卓尔

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

摘要: 正交(IQ)调制器在传统定标方法中存在定标速度慢和数据复杂难处理的问题, 在一些实际应用场合无法提供相互正交且幅值为 2 倍半波电压的射频信号。为了解决上述问题, 提出一种基于调制相位的 IQ 调制器快速精确定标方法, 在不加射频条件下实现对 IQ 调制器偏置电压的快速精确定标。测试结果表明: 该方法能在 45 s 左右完成对 IQ 调制器的定标, 且定标精度较高, 分辨率为 10 mV; 能直接控制 IQ 调制器生成抑制载波的单边带信号。

关键词: 光载无线; 正交调制器; 偏置电压; 定标方法; 相位调制

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2022)06-0018-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Rapid fine calibration method based on modulation phase for IQ modulator

LYU Jinyang, ZHOU Pengwei*, HE Zhuoer

(School of Optics and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In the traditional calibration method, the in-phase quadrature (IQ) modulator has the problems of slow calibration speed and the data is complex and difficult to process. In some practical applications, it is impossible to provide quadrature radio frequency signals with an amplitude of twice the half-wave voltage. In order to solve these problems, a rapid fine calibration method based on modulation phase for IQ modulator is proposed, which can achieve fast and accurate calibration of IQ modulator bias voltage without adding radio frequency. The test results show that this method can complete the calibration of IQ modulator in about 45 s, and the calibration accuracy is high, and the resolution is 10 mV. The IQ modulator can be directly controlled to generate single sideband signal with suppressed carrier.

Key words: radio-over-fiber, in-phase quadrature modulator, bias voltage, calibration method, phase modulation

0 引言

光载无线(RoF)通信技术是一种将光纤通信和无线通信相结合的无线接入技术, 它将射频(RF)信号调制到光载波上, 采用光纤代替金属导线的方式来传送宽带无线信号。RoF 通信技术满足了无线网络的大容

量、高速率的通信需求, 同时也加速了网络的发展^[1]。正交(IQ)调制器具有集成度高、可控参量多等特点, 被广泛应用于 RoF 系统中^[2-4]。IQ 调制器在出厂或使用前需要对各个偏置点电压的参数进行测试, 查看指标是否符合规格, 其精确的偏置电压控制常用于单边带光信号的生成^[5-7], 并且以调制器工作点附近的电压作为初始值进行调控, 便于偏置点快速稳定地实现自动控制。因此, 对 IQ 调制器常用工作点的偏置电压进行精确定标非常重要。

IQ 调制器传统的定标方法有 2 种: 一种是首先通过在 I、Q 分支的射频端口导入相互正交的幅值为 2 倍半波电压($2V_{\pi}$)的 RF 信号, 从而消除在扫描调节 I、Q 分支上马赫-曾德调制器(MZM)的偏置电压时输出的光功率存在多极值的问题^[8-10]; 然后, 通过搜索输出光功率的极大值点, 并以该极大值为基准进行多次扫

收稿日期: 2022-01-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62075202)资助; 浙江省自然科学基金项目(LY20F050008)资助; 浙江省属高校基本科研业务费专项资金资助。

作者简介: 吕晋阳(1997—), 男, 硕士研究生, 现就读于浙江杭州中国计量大学光学与电子科技学院光学工程专业, 主要从事光纤通信、光电探测、激光驱动电路的设计与调试, 以及光电调制器偏压控制电路设计与调试等方面的研究工作。

* 通信作者: 周鹏威(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电探测、光纤通信方面的研究工作。



描调节偏置电压,实现对IQ调制器偏置电压的定标。但是,这种定标方法需要导入幅值为 $2V_{\pi}$ 的RF信号,这在许多实际应用场合都无法实现。另一种是在不加RF条件下,通过控制变量法依次扫描,调节3个调制器的偏置电压,若扫描IQ调制器中单个调制器偏置电压需要 N 次,则扫描整个IQ调制器的偏置电压需要 N^3 次;通过扫描IQ调制器所有偏置电压情况下的传输曲线搜索最大值点,再以该最大值为基准进行多次扫描调节偏置电压,实现对IQ调制器偏置电压的定标。但是,这种定标方法存在定标速度慢和数据复杂难处理的问题。为此,本文提出一种基于调制相位的IQ调制器定标方法,在不加RF条件下实现对IQ调制器偏置电压的快速精确定标。

1 系统方案设计

1.1 系统原理

IQ调制器定标系统的整体框图如图1所示,其工作原理如下:首先,激光器输出恒定功率的光信号至IQ调制器;然后,光纤耦合器从IQ调制器输出端耦合出10%的光信号送至定标电路;最后,定标电路扫描,控制IQ调制器的偏置电压,采集和分析调制后的信号,实现对IQ调制器偏置电压的定标,并将结果发送至上位机。

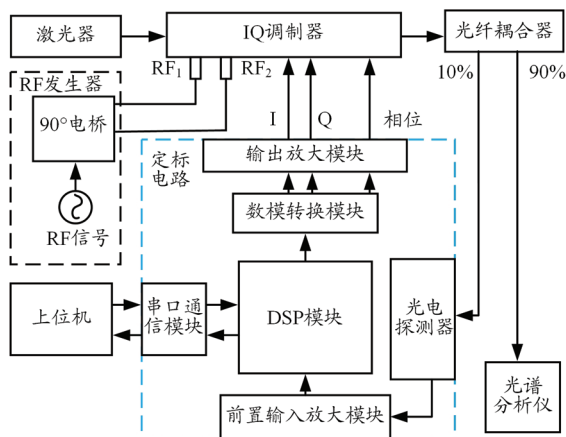


图1 IQ调制器定标系统图

1.2 硬件电路设计

IQ调制器定标系统中的定标电路由光电探测器、前置输入放大模块、数字信号处理(DSP)模块、数/模转换模块、输出放大模块和串口通信模块组成。为保证定标精度,数/模转换模块采用16位的DAC81404芯片,该芯片采用具有低噪声和高精度优点的R-2R架构,提供低漂移的内部基准电压、 ± 1 LSB积分式线性(INL)的高线性度和2.5 mV电压分辨率。

输出放大模块由3路差分放大电路和反相放大电路构成,差分放大电路如图2所示。

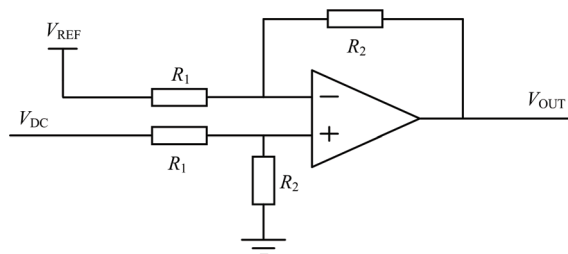


图2 差分放大电路

该差分放大电路输出电压表达为

$$V_{OUT} = \frac{R_1}{R_1} \times (V_{DC} - V_{REF}) \quad (1)$$

其中, V_{DC} 是输入信号, R_1 和 R_1 是匹配电阻。由于数/模转换器芯片的基准电压 V_{REF} 为2.5 V,而调制器的半波电压大于3 V,为保证扫描输出电压范围大于2倍半波电压以上,本文设定 $R_2=4R_1$,使系统输出电压的最大扫描范围为 ± 10 V,偏置电压的扫描分辨率为10 mV。

2 定标方法设计

2.1 定标方法推导

IQ调制器由2个MZM(MZM₁和MZM₂)和1个用于相位调制的MZM₃组成^[12],结构示意图如图3所示。其中,MZM₁和MZM₂分别嵌套在I、Q分支上对各分支的光信号进行调制,另外一个MZM₃将2个分支调制后的信号进行相位调制并汇合输出。IQ调制器的输出光功率表达式为

$$P_o = \alpha \cdot \frac{P_i}{4} \left\{ \left[\cos \left(\frac{V_{Bias1} \cdot \pi}{2V_{\pi1}} + \varphi_1 \right) + 1 \right]^2 + \left[\cos \left(\frac{V_{Bias2} \cdot \pi}{2V_{\pi2}} + \varphi_2 \right) + 1 \right]^2 + 2 \left[\cos \left(\frac{V_{Bias1} \cdot \pi}{2V_{\pi1}} + \varphi_1 \right) + 1 \right] \times \left[\cos \left(\frac{V_{Bias2} \cdot \pi}{2V_{\pi2}} + \varphi_2 \right) + 1 \right] \cos \varphi_3 \right\} \quad (2)$$

其中, P_i 为输入光功率, α 为衰减系数, V_{Bias1} 、 $V_{\pi1}$ 和 φ_1

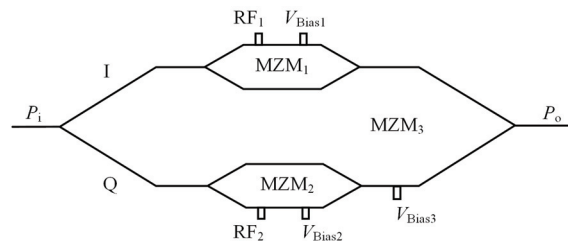


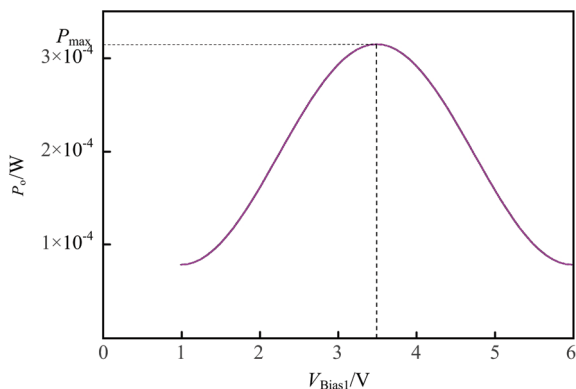
图3 IQ调制器结构示意图

分别为 MZM_1 的偏置电压、半波电压和初始相位, $V_{\text{Bias}2}$ 、 $V_{\pi2}$ 和 φ_2 分别为 MZM_2 的偏置电压、半波电压和初始相位, φ_3 为 MZM_3 的调制相位。 φ_3 大小由 MZM_3 的偏置电压变化决定,其表达式为

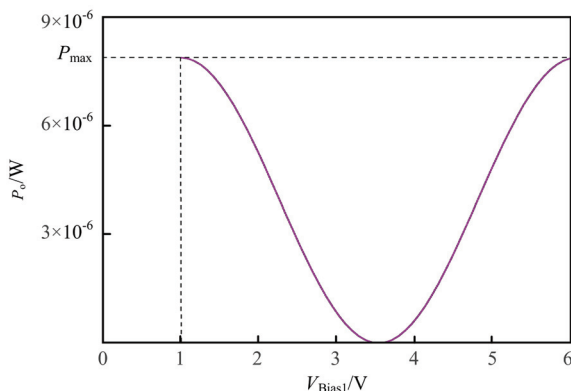
$$\varphi_3 = \frac{V_{\text{Bias}3} \cdot \pi}{2V_{\pi3}} \quad (3)$$

其中, $V_{\text{Bias}3}$ 、 $V_{\pi3}$ 分别为 MZM_3 的偏置电压和半波电压。

本文利用 OptiSystem 软件进行仿真模拟。将集成 IQ 调制器的 3 个调制器半波电压都设置为 2.5 V, 谷点(NULL 点)、峰点(PEAK 点)分别设置在 1 V、3.5 V。仿真时, 固定 $V_{\text{Bias}2}$ 、 φ_3 , 扫描 $V_{\text{Bias}1}$, 具体仿真结果如图 4 所示。从图 4(a)可以看出, 当 $V_{\text{Bias}2}$ 、 $V_{\text{Bias}3}$ 分别在 MZM_2 、 MZM_3 的 PEAK 点时, 输出光功率的极大值 P_{max} 是 $V_{\text{Bias}1}$ 扫描至 MZM_1 的 PEAK 点时得到的; 从图 4(b)可以看出, 当 $V_{\text{Bias}2}$ 在 MZM_2 的 PEAK 点和 $V_{\text{Bias}3}$ 在 MZM_3 的 NULL 点时, 输出光功率的极大值 P_{max} 是 $V_{\text{Bias}1}$ 扫描至 MZM_1 的 NULL 点时得到的。因此, 当 $V_{\text{Bias}2}$ 和 $V_{\text{Bias}3}$ 在调制器不同的偏置点时, 存在无法通过输出光功率的极大值 P_{max} 来找到 MZM_1 的正确工作点的问题。



(a) $V_{\text{Bias}2}$ 在 PEAK 点, $V_{\text{Bias}3}$ 在 PEAK 点



(b) $V_{\text{Bias}2}$ 在 PEAK 点, $V_{\text{Bias}3}$ 在 NULL 点

图 4 不同 $V_{\text{Bias}2}$ 时扫描 $V_{\text{Bias}1}$ 仿真结果图

基于上述仿真结果, 本文对式(2)进行分析, 设 IQ 调制器的 I、Q 分支输出光功率 P_I 、 P_Q 表达式为

$$P_I = \cos\left(\frac{V_{\text{Bias}1} \cdot \pi}{2V_{\pi1}} + \varphi_1\right) + 1 \quad (4)$$

$$P_Q = \cos\left(\frac{V_{\text{Bias}2} \cdot \pi}{2V_{\pi2}} + \varphi_2\right) + 1 \quad (5)$$

将式(4)、式(5)代入式(2)可得

$$P_o = \alpha \cdot \frac{P_I}{4} (P_I^2 + P_Q^2 + 2P_I P_Q \cos \varphi_3) \quad (6)$$

当固定 $V_{\text{Bias}2}$ 、 φ_3 , 只扫描 $V_{\text{Bias}1}$, 此时 P_Q 为大于等于零的定值, $\cos \varphi_3$ 为 ± 1 范围内的定值, 则输出光功率可以表示为

$$P_o = \alpha \cdot \frac{P_I}{4} [(P_I + P_Q \cos \varphi_3)^2 + P_Q^2 \sin^2 \varphi_3] \quad (7)$$

由式(7)可得, P_o 与 P_I 为一元二次函数关系。 P_I 在 0~2 W 变化, 其函数曲线如图 5 所示。当 $P_Q \cos \varphi_3 \geq 0$ 时, P_o 在 P_I 的变化范围内呈单调递增, 此时 $V_{\text{Bias}1}$ 可在 MZM_1 的 PEAK 点得到 P_o 的极大值 P_{max} , 即该情况能通过输出光功率的极大值 P_{max} 找到 MZM_1 的 PEAK 点; 当 $-2 < P_Q \cos \varphi_3 < 0$ 时, P_o 在 P_I 的变化范围内存在顶点, 此时 $V_{\text{Bias}1}$ 在 MZM_1 的 NULL 点、PEAK 点都可得到 P_o 的极大值 P_{max} , 表明无法通过输出光功率的极大值 P_{max} 找到 MZM_1 的正确工作点; 当 $P_Q \cos \varphi_3 = -2$ 时, P_o 在 P_I 的变化范围内呈单调递减, 此时 $V_{\text{Bias}1}$ 在 MZM_1 的 NULL 点时可得到 P_o 的极大值 P_{max} , 表明无法通过输出光功率的极大值 P_{max} 找到 MZM_1 的正确工作点。综上所述, 固定 $V_{\text{Bias}2}$ 、 φ_3 , 只扫描 $V_{\text{Bias}1}$ 会存在无法通过输出光功率的极大值来找到 MZM_1 的正确工作点的情况。根据对称性, 固定 $V_{\text{Bias}1}$ 、 φ_3 , 只扫描 $V_{\text{Bias}2}$ 的情况同样会存在无法通过输出光功率的极大值 P_{max} 找到 MZM_2

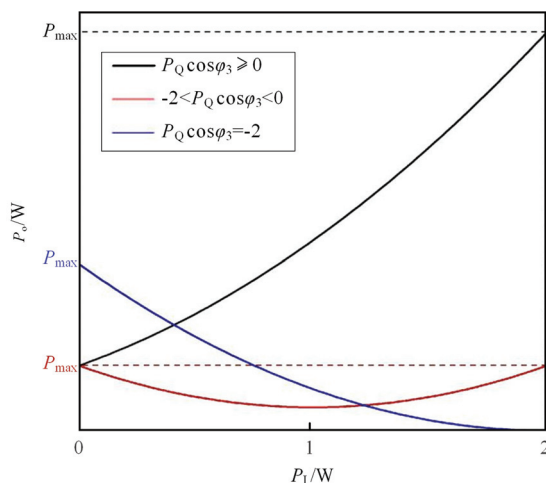


图 5 P_o 与 P_I 函数关系图

的正确工作点的问题。因此,本文通过扫描 φ_3 来确定 IQ 调制器的工作点。

当固定 V_{Bias1} 、 V_{Bias2} , 只扫描 φ_3 时, 此时 P_1 、 P_Q 为大于等于零的定值, 则输出光功率可以表示为

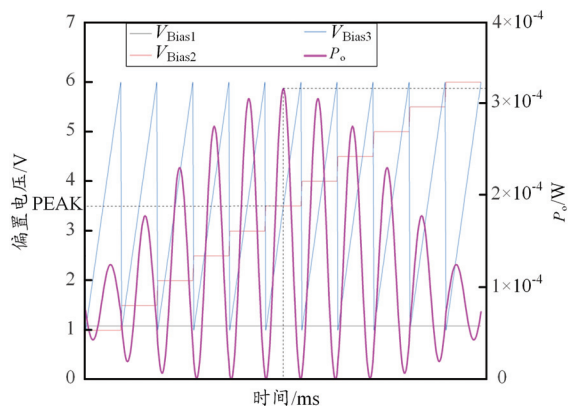
$$P_o = (\alpha \cdot \frac{P_i}{2} P_1 P_Q) \cos \varphi_3 + \alpha \cdot \frac{P_i}{4} (P_1^2 + P_Q^2) \quad (8)$$

由式 (8) 可知, P_o 与 $\cos \varphi_3$ 为线性递增关系, 当 V_{Bias3} 在 MZM_3 的 PEAK 点 (即 $\cos \varphi_3 = 1$) 时, P_o 可得到极大值 P_{max} 。将 $P_o = P_{\text{max}}$ 、 $\cos \varphi_3 = 1$ 代入式 (8) 可得

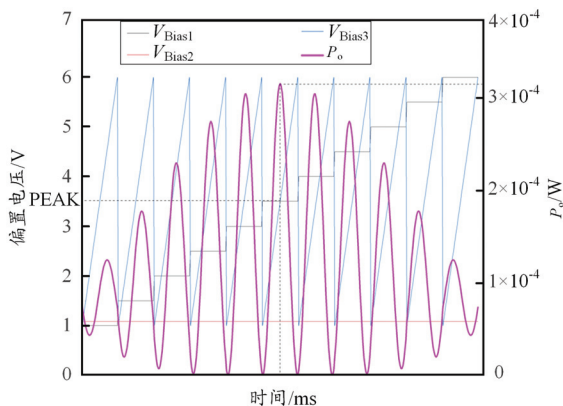
$$P_{\text{max}} = \alpha \cdot \frac{P_i}{4} (P_1 + P_Q)^2 \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 当 P_Q 不变时, P_{max} 会随着 P_1 的增大而增大, 当 $P_1 = 2 \text{ W}$ 时 (V_{Bias1} 在 MZM_1 的 PEAK 点), P_{max} 取得当前扫描范围的最大值。同样地, 当 P_1 不变, V_{Bias2} 在 MZM_2 的 PEAK 点时, P_{max} 取得当前扫描范围的最大值。因此, 扫描 φ_3 可通过极大值找到 MZM_3 的 PEAK 点, 并且还可以通过最大的极大值点找到 MZM_1 、 MZM_2 的 PEAK 点。

为了检验上述理论推导的合理性, 本文采用 OptiSystem 软件进行仿真验证, 仿真结果如图 6 所示。



(a) V_{Bias1} 改变、 V_{Bias2} 固定



(b) V_{Bias1} 固定、 V_{Bias2} 改变

图 6 相位调制 OptiSystem 仿真验证图

由图 6(a) 可知, 当 V_{Bias3} 在 MZM_3 的 PEAK 点时, 得到 P_o 的极大值, 且在固定 V_{Bias2} 、改变 V_{Bias1} 后, 当 V_{Bias1} 在 MZM_1 的 PEAK 点时, 得到当前扫描范围最大值。同样地, 由图 6(b) 可知, 当 V_{Bias3} 在 MZM_3 的 PEAK 点时, 得到 P_o 的极大值, 且在固定 V_{Bias1} 、改变 V_{Bias2} 后, 当 V_{Bias2} 在 MZM_2 的 PEAK 点时, 得到当前扫描范围最大值。这与上述理论分析一致。

2.2 定标方法流程

本文首先通过扫描调节 V_{Bias3} 、固定 V_{Bias2} 和改变 V_{Bias1} 来搜索该扫描范围内输出光功率的最大值以粗略确定 MZM_1 的 PEAK 点; 然后扫描调节 V_{Bias3} 、固定 V_{Bias1} 和改变 V_{Bias2} 来搜索该扫描范围内输出光功率的最大值以粗略确定 MZM_2 的 PEAK 点。设需要 N 次扫描 IQ 调制器中单个调制器偏置电压, 则本文的定标方法扫描整个 IQ 调制器偏置电压只需要 $2N^2$ 次即可完成粗略定标, 再以粗略定标结果为基准, 多次调节电压的步进长度和扫描范围来实现精确定标。具体定标方法的程序设计流程如图 7 所示。

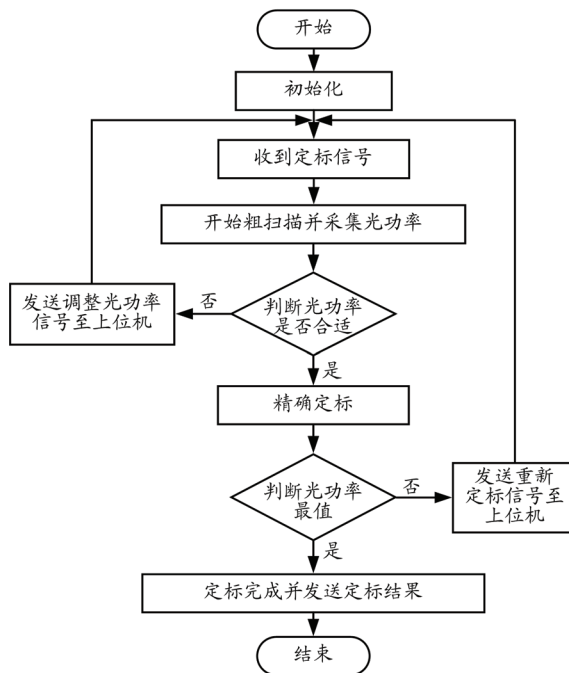


图 7 定标方法的程序设计流程图

3 系统测试

本文按图 1 所示的系统框图搭建了 IQ 调制器定标系统。系统所用仪器如下: 波长为 1550.33 nm 、输出功率为 10 mW 的分布式反馈激光器, Fujitsu 公司的 FTM7962EP 型号调制器, EM4 公司的高速光电探测器, Agilent 公司的 DSO5054A 型便携式示波器。

当定标电路收到上位机发出的定标指令后便开始扫描调节IQ调制器的偏置电压,偏置电压调节过程如图8所示。定标完成后,定标结果被发送至上位机。系统进行多次定标测试,记录每次完成定标的时间。测试结果表明:定标系统能在45 s左右完成对IQ调制器偏置电压的定标,且可靠性较高,分辨率为10 mV。



①调节Q分支MZM偏置电压; ②调节I分支MZM偏置电压;
③调节马赫-曾德干涉仪偏置电压; ④得到DP-MZM输出光功率

图8 偏置电压调节过程图

为了检测定标结果的精确性,本文将定标结果直接用于生成单边带信号。首先,定标电路将I、Q分支的MZM₁和MZM₂分别控制在各自定标的NULL点,将MZM₃控制在定标的QUAD点(中间点);然后,导入相互正交6 GHz的RF信号,该信号由HP-8341B型号的信号发生器产生,经HDH-06203AHD型号的90°电桥相位调制后生成;最后,IQ调制器输出结果由光谱分析仪(Yokogawa的AQ6370D型号)检测并显示。

测试系统中,激光器输入光波长为1550.33 nm; RF信号的频率为6 GHz,对应的波长偏移为0.048 nm,则其短边带的波长为1550.28 nm,长边带的波长为1550.38 nm。测试结果如图9所示,光谱仪检测到短边

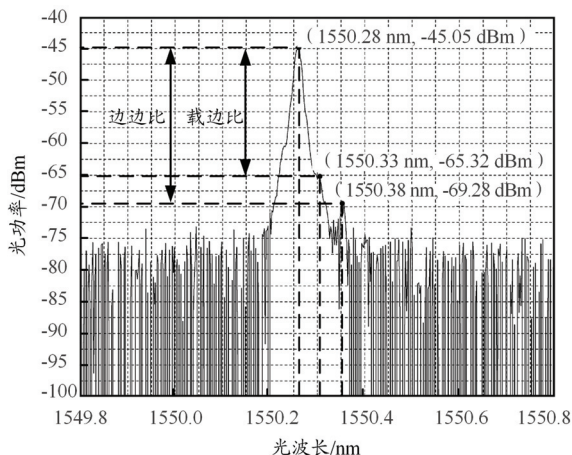


图9 测试结果图

带的波长为1550.28 nm,且信号的载边比和边边比均大于20 dB。这说明定标结果能直接控制IQ调制器生成抑制载波的单边带信号,证明了本文定标方法的定标精度较高。

4 结束语

本文在不加RF条件下设计了一种基于调制相位的IQ调制器快速精确定标方法,搭建了定标精度测试系统进行实验测试。实验结果表明:本文设计的定标方法能在45 s左右完成对IQ调制器偏置电压的快速定标,定标结果的精度较高,其分辨率为10 mV,且能直接控制IQ调制器生成抑制载波的单边带信号。该定标方法比传统定标方法更快速,更适用于实际应用场景。

参考文献:

- [1] 王一群. RoF系统中的光单边带调制与光生毫米波关键技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
- [2] 刘香玲,韩鹏,李建东,等. 双平行马赫-曾德尔调制器的单边带RoF系统[J]. 西安电子科技大学学报,2012,39(2):1-7.
- [3] ZHU G H, LIU W, FETTERMAN H R. A broadband linearized coherent analog fiber-optic link employing dual parallel Mach-Zehnder modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(21): 1627-1629.
- [4] SHI P, YU S, LI Z, et al. A novel frequency sextupling scheme for optical mm-wave generation utilizing an integrated dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. Optics Communications, 2010, 283(19): 3667-3672.
- [5] 李晶,宁提纲,裴丽,等. 基于双平行马赫曾德调制器的动态可调光载波边带比光单边带调制:理论分析与实验研究[J]. 物理学报,2013,62(22):237-242.
- [6] 樊理文. 单/双平行MZ电光调制器工作点控制及其应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2014.
- [7] 张晓宇,邱鑫静,何瑞英,等. 基于双平行马赫-曾德尔调制器的全光混频器[J]. 光通信技术,2019,43(1):47-50.
- [8] CHO P S, KHURGIN J B, SHPANTZER I. Closed-loop bias control of optical quadrature modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(21): 2209-2211.
- [9] 孟令恒,黎德,杨奇,等. 一种新型光IQ调制器自动偏压控制方法[J]. 电力系统通信,2012,33(12):71-75.
- [10] 曹剑超,杨彦甫,朱宇鹏,等. 基于IQ光调制的16-QAM光发射机多偏置电压反馈控制性能分析[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(6):56-62.
- [11] 周鹏威,卢田,吕晋阳. 导频自适应的电光调制器激光脉冲调制技术[J]. 中国激光,2020,47(6):35-41.
- [12] 王侠,唐绍宇,韦慕野,等. 基于IQ调制器产生载波抑制单边带信号的偏置控制技术[J]. 光通信技术,2021,45(4):27-31.