

功率和谐波同步检测的马赫曾德调制器偏压控制技术

周鹏威¹, 卢田¹, 张益溢¹, 李宁钊¹, 李廷安²

(1. 中国计量学院 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;
2. 浙江忆恒电子科技有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 为了克服马赫曾德调制器工作点随温度、压力等外界因素的漂移, 需要对它的直流偏压进行补偿。以往采用微扰信号谐波检测的方案偏置点定位精度高, 但由于需要在回路中附加小幅抖动信号, 会引入一定的噪声, 影响信号的纯度; 而功率检测的方案易受光源功率自身扰动的影响, 稳定性不高, 且偏置点定位性能差。提出了一种平均功率和谐波检测相结合的 MZ 调制器偏置点控制技术, 通过谐波探测确定最佳工作点, 并以光电调制器前后光功率比值作为基准值进行反馈控制, 提高了偏压控制的定位精度和噪声性能, 同时克服了激光功率自身扰动的影响。在此过程中还提出了一种通过操控误差信号实现偏置点任意调节的方案, 实现了大范围灵活的偏置点控制。实验发现, 所提出的方案具有定位精度高、稳定性好和偏置点调节范围广的优点, 能够很好地满足马赫曾德调制器偏置点控制的要求。

关键词: 马赫曾德调制器; 偏置电压控制; 功率比; 无抖动

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1220002

Mach-Zehnder modulator bias controller based on power and harmonics synchronous detection

Zhou Pengwei¹, Lu Tian¹, Zhang Yiyi¹, Li Ningchuan¹, Li Tingan¹

(1. College of Optoelectronics, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. Zhejiang Yiheng Technology Co. Ltd, Jiaxing 314000, China)

Abstract: In order to overcome the drift of Mach-Zehnder (MZ) modulator operating point by the temperature, pressure and other factors, it is necessary to compensate the voltage shift of DC bias. The previous harmonic detection method based on small dither signal has the advantage of high bias point positioning accuracy. However, a certain noise will be introduced due to the additional small signal in the loop, which will affect the purity of the radio frequency signal. The power detection working point bias method is easily influenced by the power vibration of light source, which reduces the stability and positioning accuracy of the bias point. In this paper, a MZ modulator bias point control technique was proposed, combining the average power and the harmonic detection. The optimal operating point was determined by the harmonic detection, and the ratio of the optical power before and after the electro-optic modulator was used as the reference value in feedback control. It improves the positioning accuracy and

收稿日期: 2016-04-21; 修订日期: 2016-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(61505192); 浙江省自然科学基金(Q15F050010)

作者简介: 周鹏威(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电探测、光纤通信方面的研究。Email: Zhoupw@cjlu.edu.cn

the noise performance of the bias control. Meanwhile, it overcomes the influence of the disturbance of laser power. In this method, a scheme realizing the arbitrary adjustment of bias points by controlling the ratio of optical power was also proposed and large range flexible bias point control was realized. Experimental results show that the proposed scheme has the advantages of high positioning accuracy, good stability and wide bias point, which meets well with the requirements of the MZ modulator bias point control.

Key words: Mach-Zehnder modulator; bias controller; power ratio; ditherless

0 引言

马赫曾德(MZ)调制器已被广泛用于光纤传感、微波光子学(ROF)等领域,随着应用范围不断扩大,光电子器件的环境适用性慢慢成为影响整体系统性能的关键。例如随着温度的改变,激光器的输出光功率和 MZ 调制器传递函数的相位都会受到影响而发生变化,从而导致输出光信号的失真^[1-2]。在 MZ 调制器偏置端附加低频微扰信号,利用调制函数线性区二次谐波分量最小和极值处基波分量最小的特点,自动控制 MZ 调制器偏置点的方案较为常用^[3-4]。虽然是微扰信号,但实际上为稳定工作点,线性区处所需的抖动信号幅值通常是极值点所需信号幅值的 10 倍左右,因此引入了较大噪声,对某些 ROF 系统的传输信号造成一定影响。采用功率检测的偏压控制方案由于不需要加载扰动信号,在提高信号质量上具有较大优势^[5],但传统只监测调制器输出光功率的方案易受激光光源自身功率波动的影响,稳定性不高,而且工作点位置与光路损耗有关,导致定位精度不高。

文中通过综合研究 MZ 调制器传输曲线特性,深入分析影响工作点的因素,兼顾谐波探测方案和功率检测方案的优势,提出了一种定位精度高、噪声性能好的偏压控制方案,而且克服了光源功率自身扰动的影响,并能实现大范围的任意工作点调节,对提高 MZ 调制器偏压控制电路的环境适用性有重要意义。

1 MZ 调制器控制原理分析

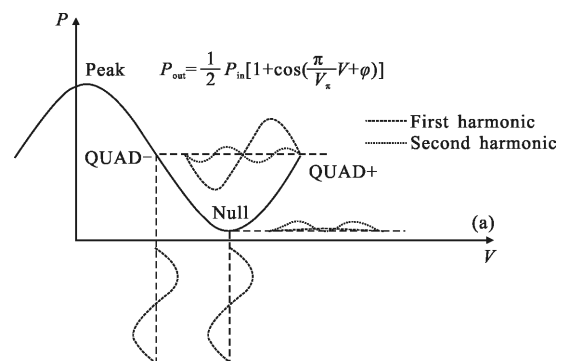
MZ 调制器的传递函数可用公式(1)近似表示^[6]:

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_{in} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{V_{\pi}} V + \varphi \right) \right] \quad (1)$$

式中: P_{out} 和 P_{in} 分别为输出和输入激光功率; V_{π} 为 MZ 调制器的半波电压; V_{π} 可认为不变, V 为加载在 MZ 调制器上的电压; φ 为 MZ 调制器的相位,常会受温度等因素影响而变化。当 φ 变化时,同一电压 V 对应的输出光功率 P_{out} 就会发生漂移,从而影响光信号的质量。

为了对 MZ 调制器性能漂移引起的信号失真进行抑制,传统手段往往采用闭环反馈的方式,首先光耦合器将调制器输出光信号分出一定比例,偏压控制电路上的光电探测器对这部分光进行探测。ROF 系统中载波信号通常是正弦信号^[7],输出光往往具有固定的平均功率,因此可以检测平均功率的变化来判断工作点的漂移;另外还可通过加载微扰信号,并检测光信号的谐波分量,以判断工作点的漂移。下面对基于微扰信号的谐波检测偏控方案进行分析。

如图 1(a)所示,当在调制器的直流偏置端加入一定频率(1 kHz)的正弦波时,在线性点 QUAD 点处,观测输出光信号的频谱时,会发现基波分量(1 kHz)的幅值达到最大,而二次谐波分量(2 kHz)的幅值最小;当工作点在极值点 NULL/PEAK 时,情况刚好相反。图 1(b)所示的微扰反馈控制方案就是根据上述特点,在设置工作点 QUAD 的时候,判断二次



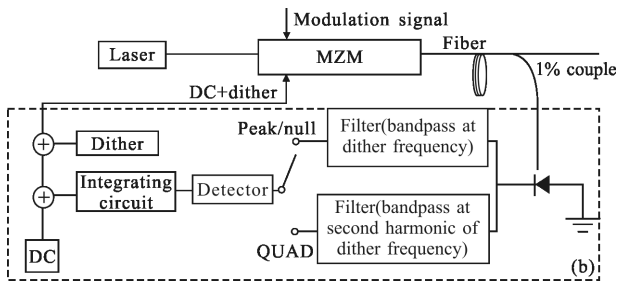


图 1 不同工作点处的谐波分量和微扰偏置控制方案

Fig.1 Harmonic signals at different working points and bias control based on small dither signal

谐波分量是否为 0, 如果不是, 则产生误差信号, 控制直流偏压向谐波分量为 0 的方向改变; 在极值点时, 则以一次谐波分量是否为 0 作为判断标准。

由上述原理可见, 对于微扰偏控方案, 一旦工作点稳定在二次谐波分量为 0 的点, 必然稳定在 QUAD 点上, 因此, 微扰方案工作点的定位精度很高。但微扰方案由于需要在调制器的直流端加入一定的低频信号, 特别是实测发现为了稳定在 QUAD 点, 所需的抖动信号幅值通常是稳定在极值点所需幅值的 10 倍以上, 可至半波电压的 4% 左右, 而 ROF 系统的高频调制信号工作在小信号模式, 因此低频扰动信号往往能达到高频调制载波信号的 1/10 左右, 此时微扰信号幅值会对高频载波调制输出光信号产生一定的干扰, 而一些应用往往需要高纯质量载波, 例如 ROF 系统、远程天线和雷达链路等。

为解决抖动信号干扰的问题, 采用基于功率检测的偏控方案是优选的方案, 如图 2 所示。该方案首先扫描偏置电压和光电二极管测得的光功率关系, 从而反推出期望工作点的光功率对应的偏置电压, 然后以该电压作为初始值, 以期望的光功率作为基准, 不断调整直流偏压使光电二极管测得的光功率始终保持期望值。采用功率反馈的控制方案适用于载波信号是正弦等占空比恒定的条件。然而该方案基于偏压和光功率扫描曲线确定工作点, 例如常采用扫描曲线上 PEAK 点光功率的一半作为 QUAD 点的对应光功率, 而没有利用 QUAD 点斜率最大这一特征, 所以该方案无法精确定位特定点 (QUAD 点等)。另外, 该方案会将激光器功率不稳引起的输出光功率变化也认为是工作点漂移引起的, 从而引入调节误差。

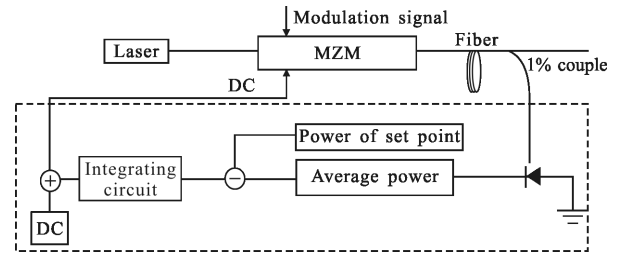


图 2 采用功率探测的偏置控制方案

Fig.2 Bias control method based on power detection

2 基于前后光功率比值的偏压控制电路

为解决激光器功率变化引入的调节误差, 文中对传统的平均功率检测方案进行了改进, 采用调制器输入和输出光功率的比值, 而不是采用单一的输出光功率作为判断依据, 这样能够从原理上抑制激光器功率不稳引起的工作点控制误差。下面对基于调制器前后光功率比值的偏控方案和工作点稳定条件进行分析。

如图 3 所示, 首先, 设激光器功率为 P_{in1} , 激光经 $1:\alpha_1$ 分光比的耦合器的接入损耗为 β_1 , 其中比例为 1 的输出端经过接入损耗为 β_3 的 FC 接口后被偏控电路的光电二极管 PD2 采集, 作为激光器功率的参考

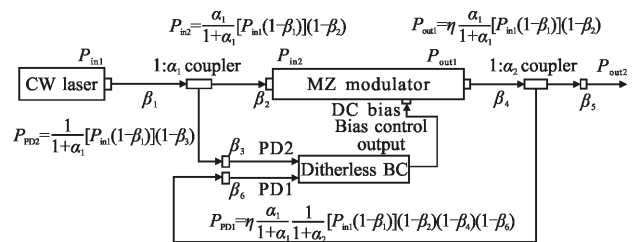


图 3 基于调制器前后光功率比值的偏控方案

Fig.3 Bias control based on power ratio detection

值; 比例为 α_1 的输出端经过 FC 接口进入调制器, 设接入损耗和调制器内部衰减损耗为 β_2 , 并设调制器全开时 (Peak 点) 输出光功率为 P_{in2} ; 设调制器工作点稳定后输出光功率为 P_{out1} , 占调制器全开时输出光功率的比例为 η ; 输出光功率经 $1:\alpha_2$ 分光比的耦合器的接入损耗为 β_4 , 比例为 1 的输出端经过接入损耗为 β_6 的 FC 接口后被偏控电路的光电二极管 PD1 采集。将 PD1 与 PD2 采集到的电流比值作为控制误差信号, 可排除激光器本身功率的变化对误差信号的影响。当 PD1 与 PD2 电流相等时, 误差信号为 0, 此

时控制回路达到稳定状态,有:

$$\frac{1}{1+\alpha_1} [P_{in}(1-\beta_1)](1-\beta_3) = \eta \frac{\alpha_1}{1+\alpha_1} \frac{1}{1+\alpha_2} [P_{in}(1-\beta_1)](1-\beta_2)(1-\beta_4)(1-\beta_6) \quad (2)$$

可得控制回路稳定后输出光功率占调制器全开时功率的比例 η 为:

$$\eta = \frac{1+\alpha_2}{\alpha_1} \frac{1-\beta_3}{(1-\beta_2)(1-\beta_4)(1-\beta_6)} \quad (3)$$

由公式(3)可见,光功率比值方案的工作点和前后耦合器分束比、电光调制器损耗与 FC 接口损耗等因素有关,而与激光器本身的功率无关,因此可以抑制光源功率变化引入的误差。但是实际情况中,FC 接口状态变化和光纤弯折引起的损耗都会变化,很难准确定位到想要的工作点,例如 QUAD 点等,影响了使用。

3 基于微扰信号辅助功率检测的反馈控制方案

为提高光功率比值方案的定位性能,文中提出了一种微扰谐波探测与前后光功率比值探测相结合的方式,如图 4 所示。该方案首先开启微扰谐波控制模式,在偏压控制信号上附加一个低频微扰信号,利用调制函数线性区二次谐波分量最小的特点,自动控制 MZ 调制器偏置点到线性 QUAD 点,实现 QUAD 点的高精度定位,等工作点稳定后,利用前后功率比值电路计算此时调制器前后光功率的比值,并将该值作为基准。然后移除微扰信号,通过不断调整调制器偏置电压,使其稳定在微扰方案确定的前后光功率比值基准上。最后设置每间隔一段时间开启微扰信号,并不断更新前后光功率比值基准,以确保信号始终稳定想要的工作点上。该方案同时具有微扰方案定位精度高和功率稳定方案引入噪声小的优点,还克服了激光功率不稳对工作点的影响。

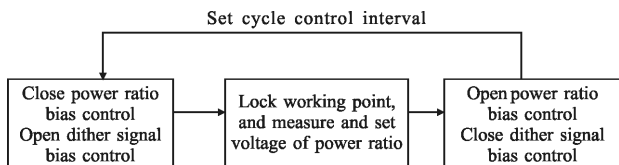


图 4 微扰信号辅助功率比值偏置控制

Fig.4 Power ratio detection based bias control assisted by small dither signal

在具体实现时,文中采用对数放大器 MAX4206 完成前后光功率比值的测量,如图 5 所示。PD1、PD2 分别将 MZ 调制器前后的激光功率转化为电流信号,然后通过 MAX4206 将 PD1 和 PD2 电流比值转换为对数输出,以此作为误差信号。如果两端流入的电流值大小相同,误差信号为零,则表明闭环控制达到稳定状态。如果两端的电流存在电流差,则 MAX4206 将电流比值以对数电压形式 V_{out} 输出,并作为误差信号实现反馈控制, V_{out} 和光功率比值的如下:

$$V_{out} \propto \log_{10} \left(\frac{P_{PD1}}{P_{PD2}} \right) \quad (4)$$

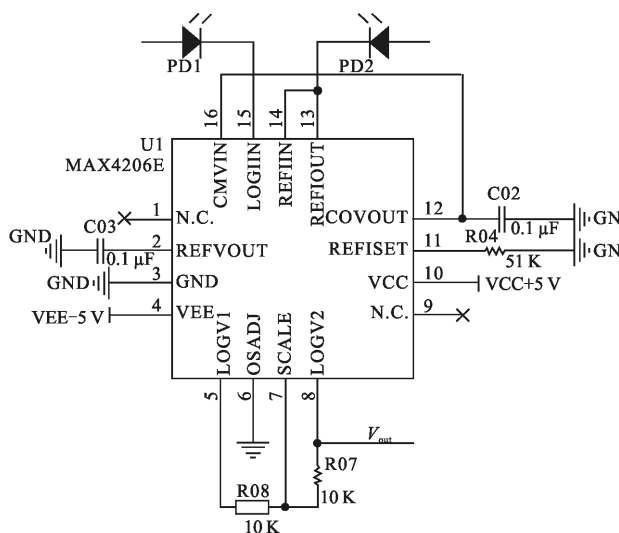


图 5 利用 MAX4206 实现调制器前后光功率比值测量

Fig.5 Measurement of optical power ratio voltage using MAX4206

由于调制器受温度变化引起的工作点和光功率漂移较缓慢,可只采用积分控制回路进行稳态误差的消除,如图 6 所示,并不需要引入比例和微分环节;同时,为了将功率检测控制方案稳定在微扰方案确定的最佳工作点上,需要电路具有任意调整工作

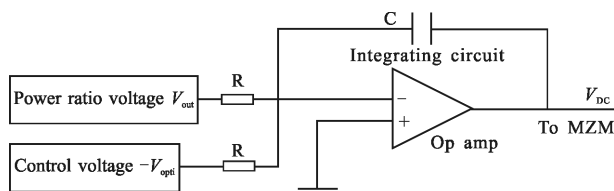


图 6 基于加法电路的任意点调控与误差积分回路

Fig.6 Arbitrary working point control based on additive circuit and error integral loop

点的功能。为了实现这一功能,文中提出了一种基于加法电路的任意工作点控制方案,通过在积分环节之前,利用加法电路在光功率比值电压上附加一个调控电压,通过改变调控电压,即可实现电光调制器大范围任意工作点的稳定。下面分析如何通过任意点调节功能稳定在微扰方案确定的最佳工作点上。

首先,设微扰方案实现最佳工作点稳定后,利用 MAX4206 测得此时前后光功率比值电压为 V_{opti} 。然后利用任意点控制功能,将 V_{opti} 电压的反向值 $-V_{opti}$ 作为调控电压,即将功率稳定方案工作时的光功率比值电压 V_{out} 和 V_{opti} 的差值作为误差信号,并对该误差信号进行积分,积分后输出电压作为调制器的偏置输入。因此当 $V_{out}=V_{opti}$ 时,积分回路达到稳态,积分电路输出、调制器偏置电压和前后光功率比值都不变,调制器刚好被控制在由微扰方案确定的最佳工作点 QUAD 点上。

为测试基于功率和谐波同步检测的偏置电路性能,实验选用 Photline MXAN-LN-20 型的 1550 nm 高速电光强度调制器,半波电压 6.5 V。光源采用 1550nm 的 10mW DFB 激光器,电光调制器输出光经光耦合器后由光功率计探测。在室温条件下进行了长时间段(1000 s)的光功率稳定性测试。如图 7 所示。

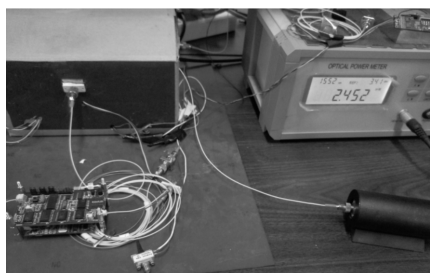


图 7 功率和谐波同步检测的偏置电路测试实验

Fig.7 Test experiment of bias control method based on power and harmonic synchronous detection

偏置电路初始工作时,微扰控制方案寻找到二次谐波分量为 0 时的工作点,作为 QUAD 的最佳工作点,利用光功率计测得的输出光功率如图 8(a)所示,同时用频谱仪测得二次谐波分量始终控制在最小值,因此微扰方案实现了精确的工作点稳定。然而由于微扰方案附加了 200 mV 左右的 1 kHz 正弦信号,使得输出的光功率中也加载有 1 kHz 的正弦功率抖动,如图 8(b)所示,因此额外引入了一定的噪声。此

时测量 PD1 和 PD2 光功率比值的 MAX4206 正常工作,用 AD 芯片测得此时光功率比值电压为 0.23 V,因此在图 6 所示的误差积分电路中利用 DA 芯片将调控电压值设定为 -0.23 V。

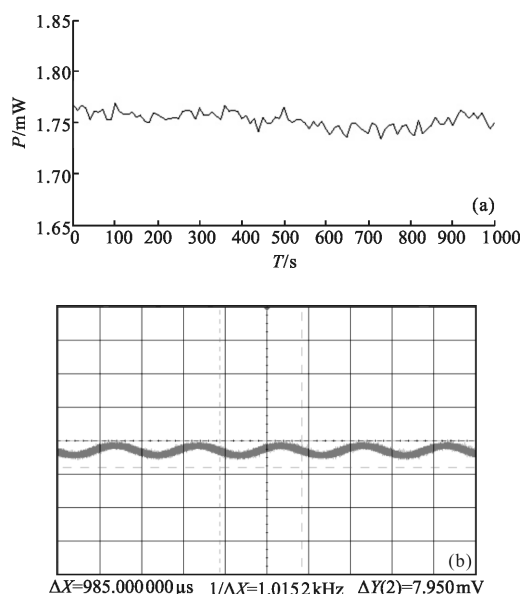


图 8 基于微扰信号的偏置控制方案输出光功率

Fig.8 Output optical power of bias control method based on small dither signal

图 9 给出了关闭微扰控制方案,且将任意点调控电压设定为 -0.23 V 后,只利用功率检测方案控制回路实现的工作点稳定效果,可见,更新完控制回路的光功率比值基准点后,光功率比值方案的输出光功率和基于微扰方案的光功率保持一致,实现了精确的 QUAD 点定位。

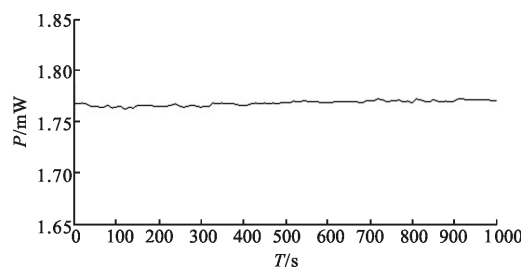


图 9 更新完工作点后功率比值方案的输出光功率

Fig.9 Optical power of power ratio detection bias control method after updating control voltage

从图 8(a)和图 9 的输出光功率的变化可以看出,微扰方案的输出光功率会有一定起伏,原因在于调

制器工作温度的缓慢上升,不仅会对调制曲线的相位 φ 产生影响,同时也会影响调制曲线的消光比,即等效为调制器内部衰减损耗 β_2 发生了变化,而微扰方案能够精确跟踪斜率最大值点,所以理想 QUAD 点对应的光功率值就会出现变化。而图 9 所示的功率比值方案虽然保持输出光功率不变,但实际上调制曲线 PEAK 点对应光功率已改变,因此其实际工作点已经漂移。由公式(3)也可得到相同的结论,在其它因素都不变的前提下, β_2 变化,就会引起工作点的变化。同样的,重新连接回路时,MZ 调制器性能、前后耦合器分束比和 FC 接口损耗等也会发生一定变化,因此 QUAD 点对应的前后光功率值也会改变,因此实际工作时,可在初始工作时和工作中设定时间间隔(例如 100 s),重复开启微扰方案并更新光功率比值电压基准值,以实现更精确的工作点定位。

由表 1 中谐波检测与功率和谐波同步检测输出光功率测试数据可知,在相同时间内,两者的平均功

表 1 谐波检测与功率和谐波同步检测数据对比
Tab.1 Contrast test data of harmonic detection with power and harmonic synchronous detection

Time/s	Harmonic detection /mW	Power and harmonic synchronous detection/mW
0	1.758	1.769
100	1.769	1.765
200	1.758	1.766
300	1.764	1.765
400	1.754	1.767
500	1.765	1.769
600	1.744	1.770
700	1.739	1.771
800	1.740	1.769
900	1.748	1.773
1 000	1.759	1.771
Average power/mW	1.754	1.769
Stander deviation/mW	0.030	0.008
Disturbed ratio of extremum/dB	0.074	0.020

率大小近似相等。而谐波检测的扰动不经频繁,而且幅值较大,其极大极小值比例为 0.074 dB,远大于功率和谐波同步检测的扰动极值比 0.020 dB,可见提

出的基于谐波和功率同步检测的方案具有高精度和高稳定性的优点,具有很高的应用价值。

4 结 论

文中将微扰方案和功率比值检测方案相结合,并设计了一种任意点调控方案,使得微扰方案确定的最佳工作点可以精确传递给基于功率比值的偏压控制方案,从而提高了功率比值方案的定位精度,同时,该方案不仅能克服激光功率扰动引起的工作点漂移,还能有效解决微扰方案的引入噪声的问题。文中通过实验证明了该方案能有效提高功率检测方案的定位精度,具有很好的实用价值。

参考文献:

- [1] Gui T, Li C, Yang Q, et al. Auto bias control technique for optical OFDM transmitter with bias dithering [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5833-5841.
- [2] Zhou P, Li T, Guo Y F, et al. Mach-Zehnder modulator bias controller for large modulation signal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0905004. (in Chinese)
周鹏威,李廷安,郭云峰,等.大调制信号马赫-曾德尔调制器偏置电压控制技术[J].中国激光,2015,42(9): 0905004.
- [3] Li Y, Zhang Y, Huang Y. Any bias point control technique for Mach-Zehnder modulator [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2013, 25(24): 2412-2415.
- [4] Wang L L, Kowalczyk T. A versatile bias control technique for any-point locking in lithium niobate Mach-Zehnder modulators [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(11): 1703-1706.
- [5] Makovejs S, Gavioli G, Mikhailov V, et al. Experimental and numerical investigation of bit-wise phase-control OTDM transmission[J]. *Optics Express*, 2008, 16(23): 18725-18730.
- [6] Zhang C, Zhang Z, Xu B, et al. A novel circuit design for bias controlling of Mach-Zehnder electro-optic modulator [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(8): 1461-1466. (in Chinese)
张彩霞,张震伟,徐贲,等.马赫曾德尔电光调制器多工作点偏压控制技术[J].光电子·激光,2013,24(8): 1461-1466.
- [7] Sisto M M, LaRochelle S, Rusch L A. Carrier-to-noise ratio optimization by modulator bias control in radio-over-fiber links [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2006, 18(17): 1840-1842.