

一种稳定的光子变频控制系统设计

代丰羽

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要:近年来,光子变频技术成为了一个突破现有微波信号变频的关键性能指标的研究热点。然而,光子变频固有的工作状态不稳定,致使该技术难以实用化。设计了一种针对单一电光外调制器的光子变频控制系统,专门用于实现光子最佳变频工作点漂移后的快速、精准和微扰动地回归。该系统利用软硬件的综合优势,通过微积分算法提取光子变频工作点的微变参量,采用控制变量的比例算法使漂移工作点快速、微扰动地回归最佳变频工作点。

关键词:微波光子;最佳变频点;控制系统;光子变频

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)12-0050-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.12.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of stable photon frequency conversion control system

DAI Fengyu

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In recent years, photon frequency conversion technology has become a research hotspot that breaks through the key performance indicators of microwave signal frequency conversion. However, the inherent working state of photon frequency conversion is not stable, which makes the technology difficult to be applied. A photon frequency conversion control system for a single electro-optic external modulator is designed, which is specially used to realize the fast, accurate and micro disturbance regression after the best photon frequency conversion working point drifts. The system takes advantage of the comprehensive advantages of hardware and software, extracts the micro variable parameters of the photon frequency conversion working point by the calculus algorithm, and returns the drift working point to the best frequency conversion working point quickly and with micro disturbance by the proportion algorithm of control variables.

Key words: microwave photonics; the best frequency conversion point; control system; photon frequency conversion

0 引言

微波频率变换的应用非常广泛,在通信、雷达、技术侦查、频谱监测、电子对抗和遥感测控等领域,特别是通信卫星载荷对微波光子变频的需求很大,欧盟已经进行了发射试验。设备需要将接收到的射频信号下变频到中频进行处理,将中频信号上变频为射频信号发射^[1-4]。传统发射机和接收机的射频电路中,频率变换通常是利用二极管、三级管的PN结和有源晶体管的非线性效应来实现,其主要性能受限于电子器件的

收稿日期: 2019-07-12。

作者简介: 代丰羽(1975-),男,四川仁寿人,硕士研究生,高级工程师。主要从事微波光子技术、模拟光通信技术、雷达对抗技术和通信对抗技术等研究。承担过多项国家级的型号装备研制和预研技术研究和多项省部级的高新技术研究。



性能^[1,3-7]。

微波光子器件具有良好的非线性特性,且具有上限频率高、瞬时带宽大、传输损耗小、电隔离度高和抗电磁干扰等特性。可利用微波光子器件的优良特性,在光域内实现微波信号的频率变换^[5,8-11]。该技术具有工作上限频率高、变频动态范围大、瞬时宽带宽、本振隔离度高、抗损毁和抗电磁干扰能力强等优点,同时还能实现微波信号的低损耗、长距离传输。

然而,光子变频器件对外界的温度、应力和湿度等环境变化十分敏感,最佳变频点受外界环境影响会呈现无规则的变化,从而影响变频输出信号的功率和相位稳定性^[7,12-14]。因此,研制一种光子最佳变频点高速回归控制系统是光子变频技术实用化的核心技术之一。本文设计一种基于单一电光调制器的光子变频控制系统。

1 光子变频控制系统总体设计

光子变频控制系统利用精简的硬件平台,通过软件算法提取特征参数、进行综合运算和形成控制结论,克服电光调制器随工作温度、应力和湿度等外界环境变化呈现的电光转换工作点不稳定的问题,快速、微扰动地将光子变频的工作点稳定在最佳光子变频点(V_π 或 V_0)临近区域,使变频后输出信号的相位和功率保持稳定。电光调制器的电光转换原理如图1所示(T 为电光调制器, V_{bias} 为偏置电压)。

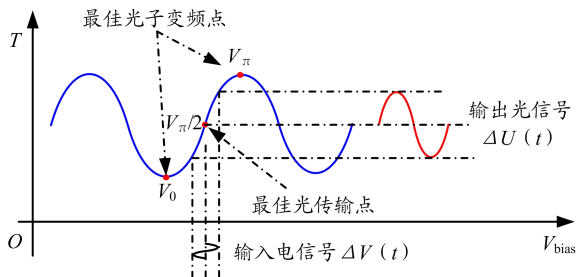


图1 电光调制器的电光转换原理

由图1可知,最佳光子变频点处于电光转换函数的最高点或最低点(准确控制难度大),光电转换的放大效应十分明显(转换系数较大),并且该电光转换工作点的状态不稳定。因此,变频工作点的细微漂移就会造成变频后的微波信号的功率和相位的较大变化。为此,本文设计了基于单一电光调制器的光子变频控制系统。控制系统包括光电转换模块、信号提取模块、信号处理模块、决策模块和驱动电路模块等部分,光子变频控制系统如图2所示。

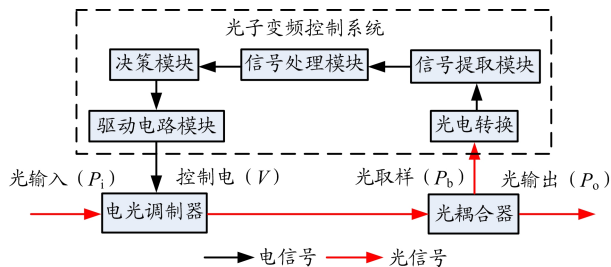


图2 光子变频控制系统

光子变频控制系统的工作原理为:首先,利用硬件电路提取电光调制信号的参数后,通过软件算法拟合出电光调制器的一元二次电光转换函数方程 $f(x)$ 。然后,对该曲线方程进行1次微分,运算结果用于判断当前工作点是否处于最佳光子变频工作点($f'=0$, f' 为函数的一阶导数)临近区域;对该曲线方程进行2次微分,运算结果用于分辨当前工作点在最高变频工作点($f''<0$, f'' 为函数的二阶导数)或最低变频工作点($f''>0$)临近区域。随后,对曲线方程进行等间距积分

运算确定电光调制器的工作点增量方向。最后,根据微积分结果判断当前工作点在电光调制器的电光转换图形中所处位置,并确定控制变量的增量方向和调整控制增量值的大小。按照上面的运行方式不断地循环运算,实现光子变频工作点的快速、精准和微扰动地回归最佳变频工作点。光子变频控制系统工作流程如图3所示。

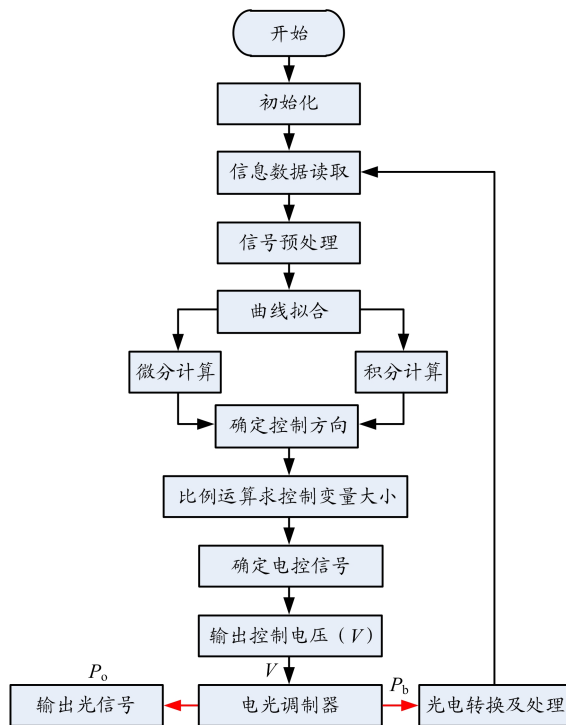


图3 光子变频控制系统工作流程

2 控制系统的硬件平台

控制系统的硬件平台主要用于支撑控制系统的软件算法和对外通信,实现取样光信号的光电转换、信号功率线性放大、扰动信号滤除、模数转换和数据信号缓存等功能,完成控制信号的模数转换、信号放大等功能。控制系统的硬件平台组成如图4所示。

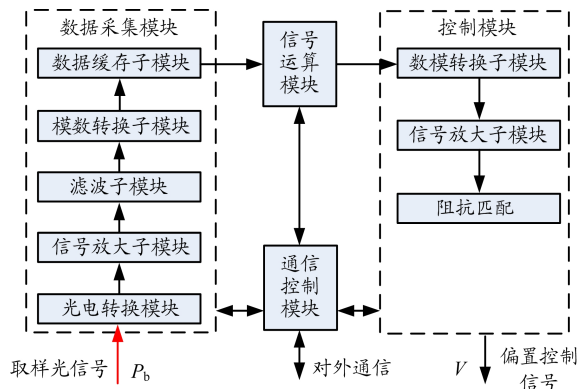


图4 控制系统的硬件平台组成

图4中,滤波模块需要将取样信号中的业务信号(通常为10 MHz以上)、其它串扰信号等变频控制系统的有用信号外的干扰信号滤除。因此,需要将该滤波模块设计为频率尽可能低的低通滤波模块,但同时也需要保障控制系统的有用工作带宽(500 kHz左右),本文综合考虑以上因素将其设计为1 MHz的低通滤波模块。

3 信号数据运算及控制信号运算

信号数据运算主要是根据光取样获取的数字信息,按照预先设定的运算规则运算出当前工作点在电光调制器的电光转换曲线(图1)中所处的位置及与最佳光子变频工作点的位置关系等,并形成电光调制器的偏置电压 V_{bias} 的控制策略。控制信号运算主要根据控制策略,按照预先设定的控制变量比例算法,产生尽可能小的扰动、尽量快地回归最佳光子变频工作点。

3.1 离散数据曲线拟合

由于电光调制器的转换函数随外界工作环境变化呈现无规律的移动,同时光源输出功率的长时不稳定性、输入的微波信号功率的不确定性等原因,会造成电光转换曲线畸变,因此需要实时地对其转换函数进行曲线拟合。离散数据曲线拟合主要是利用数据采集模块获取的有用取样信号拟合出电光调制器的电光转换函数曲线(图1)。本文采用不断移动的二维数据拟合电光转换曲线的一元二次函数方程。离散数据曲线拟合方式如下:

存储满3个点 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 就可进行曲线拟合,得到曲线的表达式为:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

其中, a 、 b 、 c 分别表示方程式的二次项系数、一次项系数和常数项系数。

3.2 微分积分运算

微积分运算是为了获取当前变频工作点在电光调制器的电光转换函数曲线中的位置。当 $f'=0$ 时,正处于最佳光子变频工作点 (V_π 或 V_0), f' 的值越小,当前工作点距离最佳光子变频工作点越近;反之,当 f' 的值越大,距离最佳光子变频工作点越远。当 $f''>0$ 时,工作点处于 V_0 的最佳光子变频点区域;反之,当 $f''<0$ 时,处于 V_π 的最佳光子变频点区域; $f''=0$, 处于最佳传输点; $|f''|$ 越大,越接近最佳光子变频工作点。

对拟合曲线方程 $f(x)$ 进行一次微分计算,得到表达式:

$$f'(x) = 2ax + b \quad (2)$$

代入 x_1 、 x_2 、 x_3 计算数据值 $f'(x_1)$ 、 $f'(x_2)$ 和 $f'(x_3)$ 。对方程进行二次微分计算,得到表达式:

$$f''(x) = 2a \quad (3)$$

将 $2a$ 代入拟合曲线方程 $f(x)$ 中,计算本次3个数据点拟合曲线的极值点 $(2a, 2a^3 + 2ab + c)$ 。拟合曲线的极值点逼近最佳光子变频点。对拟合曲线方程 $f(x)$ 进行一元积分计算,得到表达式:

$$\int f(x) = \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx \quad (4)$$

比较 x_1 、 x_2 、 x_3 与 $2a$, 把 x_1 、 x_2 、 x_3 中与 $2a$ 最靠近的点标记为最靠近最佳光子变频点的拟合点,将此值代入一次积分式(4)计算增量结果。

3.3 控制变量变化方向运算

根据 f' 、 f'' 和 $\int f(x)$ 的运算结果,进行综合运算就可

以确定当前工作点在电光转换函数曲线中的位置,并可确定下一步的控制变量的调制方向,产生相应的调整策略。工作位置与转换函数曲线关系如图5所示。控制变量变化方向具体运算如下:

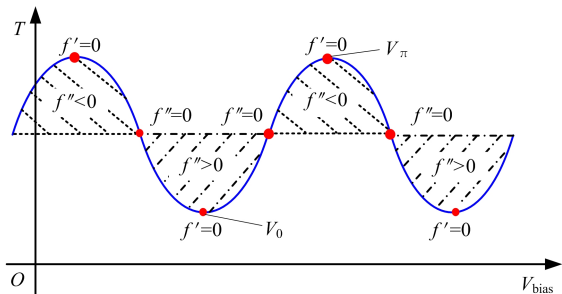


图5 工作位置与电光调制器的转换函数曲线关系

对计算所得的 f'' 的正负进行判断,再判断 x_1 、 x_2 、 x_3 所对应的一次微分值的正与负并比较其值大小。

图5中,若 $f''>0$,点 $(2a, 2a^3 + 2ab + c)$ 在 V_0 区域(临近 V_0 工作点的区域);假如 x_1 、 x_2 、 x_3 的 $f'<0$,即 x_1 、 x_2 、 x_3 在 V_0 左边,控制变量需从 V_0 点左边以正方向调节光信号靠近 V_0 ;假如 x_1 、 x_2 、 x_3 的 $f'>0$,即 x_1 、 x_2 、 x_3 在 V_0 右边,控制变量需从 V_0 点右边以负方向调节光信号靠近 V_0 。若 $f''<0$,点 $(2a, 2a^3 + 2ab + c)$ 在 V_π 区域(临近 V_π 工作点的区域),假如 x_1 、 x_2 、 x_3 的 $f'<0$,即 x_1 、 x_2 、 x_3 在 V_π 右边,控制变量需从 V_π 点右边以负方向调节光信号靠近 V_π ;假如 x_1 、 x_2 、 x_3 的 $f'>0$,即 x_1 、 x_2 、 x_3 在 V_π 左边,控制变量需从 V_π 点左边以正方向调节光信号靠近 V_π 。

当前工作点在转换函数曲线的位置及需移动方向如图6所示。

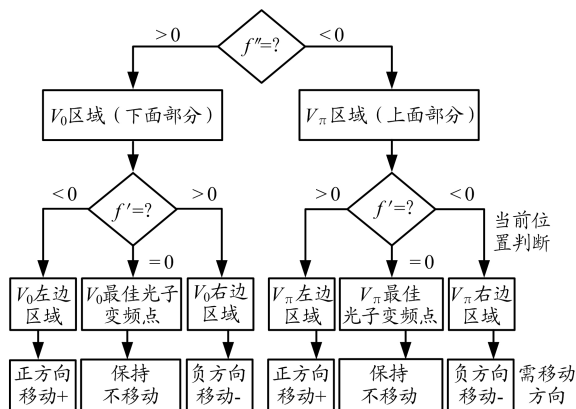


图6 当前工作点在转换函数曲线的位置及需移动方向

3.4 控制电压数值运算

控制电压数值运算的原则是当前位置在最佳光子变频工作点时,不调整工作状态;当偏离最佳工作点时,越靠近最佳光子变频工作点调整的步进越小,越远离最佳光子变频工作点调整的步进越大。最终实现既快速又低扰动地控制当前工作位置回归最佳变频工作点。本文利用拟合函数一次微分值的特点和 V_{bias} 初值(当前光子变频工作点所处位置的实际控制电压值 A_{n-1})叠加运算,确定电光调制器的需调整的偏置控制电压 V_{bias} 数值。控制变量偏移调整值 M_n :

$$M_n = k |A| \quad (5)$$

其中, $|A|$ 是拟合点的一次微分值; k 为经验值,与光调制器的控制电压、信号放大模块的增益量相关,根据控制系统实际测量设定,取值范围在 0~5。 n 表第 n 次拟合曲线。利用叠加运算确定 V_{bias} 控制电压数值 A_n 为:

$$A_n = \sum_{i=1}^n M_i \quad (6)$$

根据控制变量方向确定 V_{bias} 的正负和控制电压数值运算确定控制变量的大小,最终运算获得电光调制器的 V_{bias} 实时控制电压值为 $\pm |A_n|$ 。将运算结果 $\pm |A_n|$ 发送至控制模块执行 V_{bias} 光子变频工作点调整。

按照以上运算方式不断循环运算处理,实现工作点的实时调

整,保障光子变频工作点始终工作在最佳光子变频工作点临近区域。

4 变频控制系统的实验验证

本文依托某科研项目研制了基于单一电光调制器的变频控制系统。该项目由于采用传统的微波上变频满足不了瞬时动态范围 ≥ 40 dB(输入微波功率 ≥ -15 dBm,噪声系数 ≤ 15 dB 等条件下)的要求,因此采用了本论文的光子变频技术。该系统包括:光源模块(Xeston Technologies:XQF938-50-01)、微波本振模块(克莱微波:GJT-NMX-02)、低噪放(克莱微波:GJT-LA0942-01)、功分器(泰格:TGP-A0214)、电光外调制器(Optilab:IMC-1550-20)、变频控制模块(本文设计)、电源模块(自制)、光电转换器(Picometrix:P-18A)和功率放大器(克莱微波:GJT-PA0942-02)等。该系统实现了将 L 频段(950~1750 MHz)变频到 C 频段(3.4~4.2 GHz)的光子上变频。实验系统的组成框图如图 7 所示。实验系统实物及变频控制板实物如图 8 所示。

本实验系统使用一个 Optilab 公司的 IMC-1550-20 电光调制器作为变频核心器件实现微波信号光子上变频。实验系统的工作原理如下:首先,光源模块产生的光信号(1550 nm)送入电光调制器,变频控制模块利用该光信号将电光调制器调整到变频工作状态(V_{π});然后,中频(IF)信号经低噪声放大器进行功率放大后与微波本振模块产生的本振(LO)信号(5.15 GHz)在功分器内进行微波信号合路,并形成中频本振(IF&LO)信号;随后,IF&LO 信号经电光调制器调制到光域,并利用光子器件的非线性特性实现微波信号频率的变换,生成光载混频信号;最后,该信号经长距离传输、光电转换和信号选频放大等过程后,获

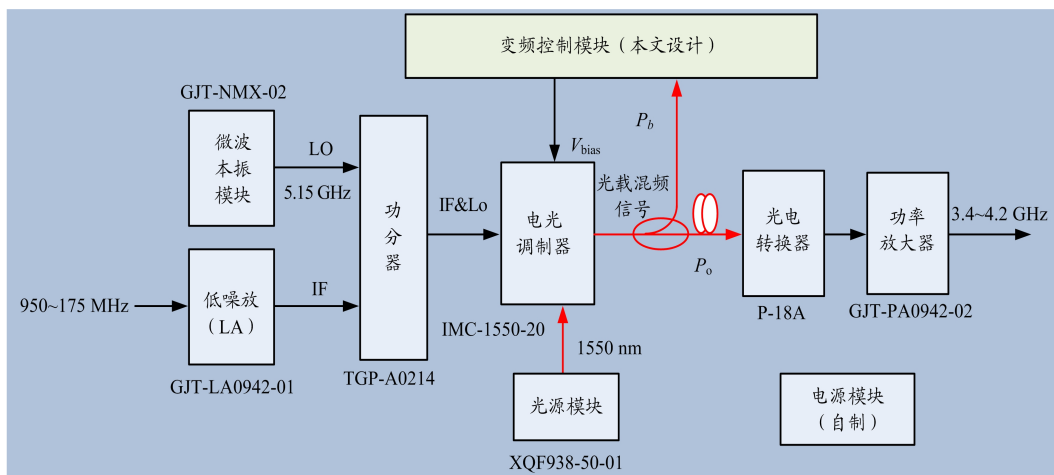


图7 实验系统的组成框图

得所需的上变频微波信号。随后的工作中,变频控制模块不断采集电光调制器的输出光信号,实时修正电光调制器的变频工作点,保证上变频获得的微波信号的功率和相位稳定。实验系统的测试参数如表 1 所示。

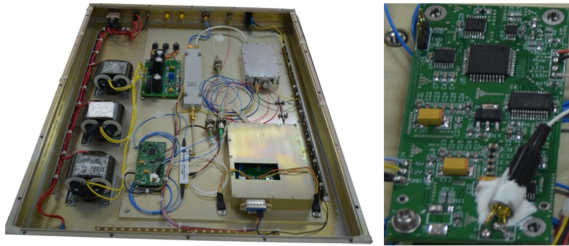


图 8 实验系统实物及变频控制板实物

表 1 实验系统的测试参数

参数名称	测试结果	参数名称	测试结果
输入频率 (MHz)	950~1750	光波长 (nm)	1550
输出频率 (GHz)	3.4~4.2	长时稳定	0.24 dBc@24 h
瞬时工作带宽 (MHz)	800 MHz	传输距离 (km)	20
瞬时动态范围 (dBc)	45.4	噪声系 (dB)	14.3
输入 1 dB 压缩点(dBm)	-15	工作温度	-10 ℃~+55 ℃
带内平坦度	0.9 dB@ 全频段 0.21 dB@40 MHz	存储温度	-40 ℃~+55 ℃

本实验系统进行了工作温度实验、存储温度实验、运输振动实验等环境实验和 24 h 拷机实验,均能达到各项技术指标要求。本实验设备于 2015 年 12 月交付用户使用至今已有 3.5 年时间,各项指标仍然满足用户使用要求。因此,本文设计的光子变频控制系统经实践验证,稳定性、可靠性等性能达到了实用化水平。

5 结束语

本文采用软件和硬件结合的优势,快速、精准和微扰动地将光子变频设备的工作点始终控制在最佳变频点临近区域,实现了基于一个单臂电光外调制器的光子变频设备在各种工作环境下输出功率和相位

的长期稳定,推动了光子变频技术的实用化进程。该变频控制系统通过适当地改进,可应用于基于双臂电光调制器、级联式电光调制器的光子变频设备和光传输的电光外调制器偏置控制等系统。

参考文献

- [1] LONGTAO X, SHILEI J, YIFEI L. Frequency down-conversion using photodiode sampling [J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron, 2016, 50 (12): 271–274.
- [2] ESAKKIMUTHU K, SIVANANTHA RAJA A, SHANMUGAPRIVA G. frequency 16-tupled optical millimeter wave generation using dual cascaded MZMs and 2.5 Gbps Rof transmission [J]. Light Electron Opt., 2017, 140: 338–346.
- [3] ALTAQUI A, CHAN E H, MINASIAN R A. Microwave photonic mixer with spurious-free dynamic range[J]. Appl Opt., 2014, 53(17): 3687–3695.
- [4] BRWIN H W C, ROBERT A M. Microwave photonic downconverter with high conversion efficiency[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(23): 3580–3585.
- [5] CHEN H, CHEN L, YU J, et al. Experimental investigation for 60 GHz radio-over-fiber system employing orthogonal frequency-division multiplexing format based on companding transform [J]. Acta Optical Sinica, 2012, 32(3): 30–35.
- [6] TANG Z, ZHANG F, ZHU D X, et al. A photonic frequency downconverter based on single dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. IEEE Topical Meeting Microw. Photon., 2013, 42(12): 150–153.
- [7] SCOTTISH F, LAGHEZZA F, ONORI D, et al. Microwave photonics for integrated multifrequency lidar/radar system [C]. Photo-Electron and Commun.Conf., June 28 –July 2, 2015, Shanghai, China. Shanghai: OECC2015, 2015: 1–4.
- [8] BIL R, HOLPP W. Modern phased array radar systems [J]. 2016 IEEE Int. Symp. Phased Array Syst. Technol., 2016, 5(8): 1–7.
- [9] HMOOD J K, NOORDIN K A, AROF H, et al. Peak-to-average power ratio reduction in all-optical orthogonal frequency division multiplexing system using rotated constellation approach [J]. Optial Fiber Technology, 2015(25): 88–93.
- [10] ANTAO CHEN, EDMOND J. MURPHY. Broadband optical modulators: Science, Technology, and Applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2012: 329–382.
- [11] LI X, ZHAO S, ZHU Z, et al. An optical millimeter-wave generation scheme based on two parallel dual parallel Mach-Zehnder modulators and polarization multiplexing [J]. Journal of Modern Optics, 2015, 62 (18): 1502–1509.
- [12] STAVROS I. Microwave photonics: devices and applications [M]. Wiltshire: IEEE Press, 2009: 191–233.
- [13] 李泽. 微波光子信号处理中若干关键问题的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.