光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.024

空间激光通信高速多制式光调制技术

兰 枫*，韩 婷，郭精忠
（西安空间无线电技术研究所，西安 710100）

摘 要： 空间激光通信调制技术以幅度调制和相位调制为主，单一通信终端只能适应特定的调制格式，灵活性较差，存在星间链路组网应用的局限性。文章基于数字处理的光调制技术，采用 $LiNbO_3$ 晶体正交相位调制器，结合闭环偏压控制算法，实现了光调制格式、调制速率可变的星载光调制器，并针对空间应用对幅度调制和相位调制方式进行了优化，最大化光纤放大器效率。该技术硬件实现了 625 Mb/s～5 Gb/s 通信速率分档可调，OOK，BPSK 和 QPSK 调制格式可变，发射 EVM 优于 9%，实际引入灵敏度损耗小于 1 dB。该调制器已经完成所有空间环境试验，可广泛适用于各种体制的激光通信终端，进行星地、星间激光通信建链。同时，该调制器具备模拟调制的功能，可实现星间微波光子信号的透明转发。

关键词： 空间激光通信；多调制格式；多速率
中图分类号： TN929.11 **文章编号：** 1001－5868(2020)06－0884－05

Multi-format Optical Modulation Technique with High Bit Rate for Space Laser Communication

LAN Feng, HAN Ting, GUO Jingzhong
(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, CHN)

Abstract: The amplitude modulation and phase modulation are the key techniques in laser communication systems, but there is a limitation in satellite network with inter-satellite links as single laser terminal can only have a specific modulation format. In this paper, an optical modulation technique which is compatible with multi-modulation formats and bit rates based on digital processing was described. A $LiNbO_3$ quadrature modulator combined with closed-loop bias control algorithm was applied to implement amplitude modulation (OOK modulation), phase modulation (BPSK modulation) and multilevel phase modulation (QPSK modulation) in a signal modulator. The modulation bit rate can be tuned from 625 Mb/s to 5 Gb/s according to different modulation formats of OOK, BPSK and QPSK. The transmission EVM is less than 9% with coding and scrambling functions and the inducted loss for the receiving sensitivity is less than 1 dB. This modulator has been verified in all environment experiments such as vibration test, thermal vacuum circle test and radiation test and could be used in various laser communication terminals. The modulator realizes the function of analog modulation, so it is expected to be used as a transparent transponder for microwave photonic signal.

Key words: space laser communication; multi-modulation formats; multi-bit rates

0 引言

对地观测数据等业务的迅速发展，需要更高速率的对地数传。空间激光通信，尤其是相干通信，由于其发散角小、数传速率高、安全性高，越来越受到各国的重视。由 ESA 和 DLR 支持、德国 TeSat 研制的新一代数据中继系统(EDRS)[1]中的高轨卫星

收稿日期：2020－07－02.
*通信作者：兰 枫 E-mail：3201581996@163.com

AlphaSat 和低轨卫星 Sentinel-1 在 2014 年底实现了双向在轨通信验证[2]，其信息速率为 300 Mb/s～1.8 Gb/s，采用 BPSK 相干探测。NASA 也公布了其高轨激光通信演示计划(LCRD)[3]，拟采用 DPSK 调制，速率为 2.4 Gb/s。日本对高速空间相干通信也进行了大量研究，在实验室实现了 2.5 Gb/s 的 BPSK 信号传输[4]。国内也逐步开始进行高速空间激光通信实验。

随着天地一体化网络的发展，天基骨干网和天基接入网的接入激光终端根据应用场景不同，通信体制也不尽相同。如果针对 OOK/BPSK/DPSK/QPSK 设计不同的调制器，则需要设计三种不同的接收组件，严重降低了发射组件的批产能力，同时也限制了星间链路组网的应用。本文提出基于数字处理软件的多格式调制技术，可完全兼容 OOK/BPSK/DPSK/QPSK 调制格式，可满足高轨对高轨、高轨对低轨、地轨对地轨，以及卫星对地面站等不同距离下，多种调制格式、多种速率信号的自适应调制发射。同时，可以实现模拟调制，进行微波光子信号的透明转发。该调制器可实现 625 Mb/s，1.25 Gb/s 和 2.5 Gb/s 的 BPSK/OOK 调制，2.5 Gb/s 和 5 Gb/s 的 QPSK 调制，EVM 小于 9%，实际引入灵敏度损耗小于 1 dB，具备编码、加扰等功能，工作温度适应 0～50 ℃，波长稳定性优于 0.03 nm，线宽优于 150 kHz，功耗小于 28 W。

1　多制式光调制技术分析

空间激光通信调制技术多采用幅度调制和相位调制，相应使用强度调制器和相位调制器，在面对多体制卫星星间组网应用时，显得灵活性不足。采用马赫-曾德尔调制器(MZM)，可以兼容幅度调制和相位调制，适用于多种应用场景。

如图 1 所示，正交相位调制器(Quadrature Modulator)可以看做由两个马赫-曾德尔调制器(MZM)嵌入一个马赫-曾德尔干涉仪(MZI)，其中两个MZM调制器各有一个直流偏置电极V_B和射频信号输入电极$V_{RF}(t)$，MZI 有一个相位调整电极，用来调整两路调制器输出光的相位差$\Delta\phi_{IQ}$。

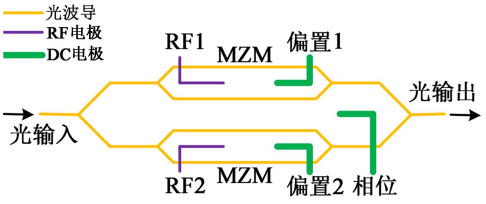


图 1　正交相位调制器构成

1.1　偏压控制算法

单路 MZM 调制器输出功率表达式为[6]

$$P_I(t)=\frac{kP_i}{4}\left[1+\cos\left(\pi\frac{V_{RFI}(t)+V_{BI}}{V_\pi}\right)\right] \quad (1)$$

$$P_Q(t)=\frac{kP_i}{4}\left[1+\cos\left(\pi\frac{V_{RFQ}(t)+V_{BQ}}{V_\pi}\right)\right] \quad (2)$$

式中，P_i 为信号光输入功率，k 为调制器插入损耗，$V_{RFI}(t)$和$V_{RFQ}(t)$分别为 I 路和 Q 路的射频信号输入，V_{BI} 和 V_{BQ} 分别为 I 路和 Q 路的直流偏置电压，V_π 为调制器产生附加相位为 π 时的电压，对应整个光波相位周期的一半，也称半波电压。

MZM 调制器输出功率对直流偏置电压的响应曲线如图 2 所示，存在输出功率最大点($2V_\pi$)、最小点(V_π)和中间点($V_\pi/2$)。

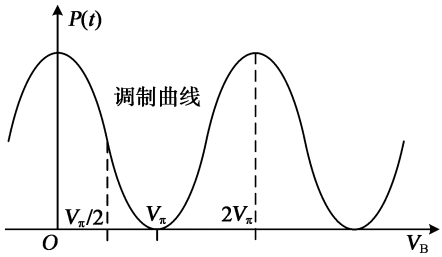


图 2　平均输出功率响应曲线

1.1.1　OOK 调制偏压控制算法

如图 3 所示，对于 OOK 调制，MZM 直流偏置点应该工作在输出功率中间点，同时射频信号电压峰峰值 V_{pp} 应小于 V_π，以保证 MZM 调制器工作在线性区。当直流偏置点稳定工作在中间点时，射频信号峰峰值越接近于 V_π，输出功率振幅越大，消光比最佳，光放大器的效率最高。这里选择 V_{pp} 等于 V_π，即

$$V_{RFI}(t)=\begin{cases}\dfrac{V_\pi}{2}, & \text{符号为“1”}\\[2ex] \dfrac{-V_\pi}{2}, & \text{符号为“0”}\end{cases} \quad (3)$$

由式(1)可得，输出功率振幅 P_{pp} 为

$$P_{pp}=\left|\frac{kP_i}{4}\left[1+\cos\left(\pi\frac{\frac{V_\pi}{2}+V_{BI}}{V_\pi}\right)\right]-\frac{kP_i}{4}\left[1+\cos\left(\pi\frac{\frac{-V_\pi}{2}+V_{BI}}{V_\pi}\right)\right]\right|=$$

$$\left|\frac{kP_{\mathrm{i}}}{2}\sin\frac{\pi V_{\mathrm{BI}}}{V_{\pi}}\right| \tag{4}$$

因此，当 $V_{\mathrm{BI}}=mV_{\pi}/2(m=\pm1,\pm2,\cdots)$ 时，输出功率的振幅为最大。OOK 调制格式下，偏压控制算法的核心就是保证输出功率的振幅最大。对于 Q 路信号来说，在 OOK 调制格式下，可以将 Q 路光功率输出设为零点。

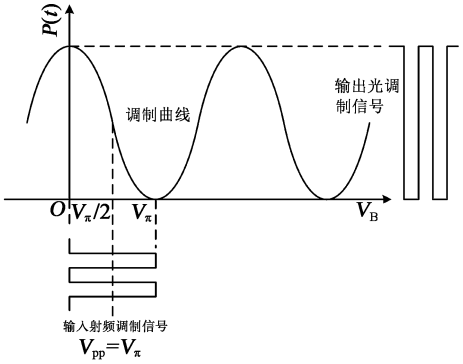


图 3 OOK 调制平均输出功率响应曲线

1.1.2 BPSK 调制偏压控制算法

对于相位调制，MZM 直流偏置点应该工作在零值点 $V_{\mathrm{B}}=\pm V_{\pi},\pm3V_{\pi},\cdots$，射频电压信号峰峰值小于 $2V_{\pi}$，输入输出传递曲线如图 4 所示，输出光功率大小与射频信号电压峰峰值相关，当峰峰值等于 $2V_{\pi}$ 时，输出信号光功率最大，更适合空间激光通信传输。

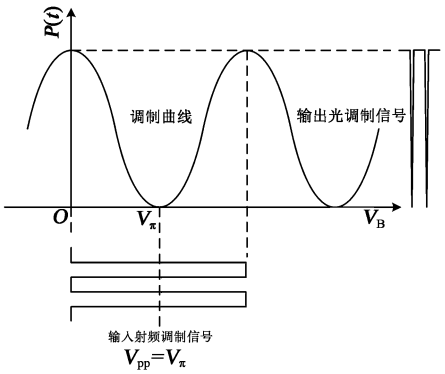


图 4 BPSK 调制平均输出功率响应曲线

零值点是图 2 所示传递曲线的最小点，必要条件是一阶导数为 0，因此对公式(1)的 V_{B} 求导数：

$$\frac{\partial(P_{\mathrm{I}}(t))}{\partial V_{\mathrm{BI}}}=-\frac{kP_{\mathrm{i}}}{4}\frac{\pi}{V_{\pi}}\sin\left(\pi\frac{V_{\mathrm{RFI}}(t)+V_{\mathrm{BI}}}{V_{\pi}}\right)=0 \tag{5}$$

展开三角函数为

$$\sin\frac{\pi V_{\mathrm{RFI}}(t)}{V_{\pi}}\cos\frac{\pi V_{\mathrm{BI}}}{V_{\pi}}+\cos\frac{\pi V_{\mathrm{RFI}}(t)}{V_{\pi}}\sin\frac{\pi V_{\mathrm{BI}}}{V_{\pi}}=0 \tag{6}$$

式中，$V_{\mathrm{RFI}}(t)$ 为射频输入调制信号，峰峰值小于 $2V_{\pi}$，且符号“1”和符号“0”电平关于直流偏置点对称，因此 $\sin\frac{\pi V_{\mathrm{RFI}}(t)}{V_{\pi}}$ 在一段时间内积分值为 0。满足公式(5)成立的条件为 $V_{\mathrm{BI}}=m\pi(m=0,\pm1,\pm2,\cdots)$。

显然，当直流偏置点位于最大点和最小点时均能满足一阶导数为 0，需要对输出功率 $P_{\mathrm{I}}(t)$ 对偏置电压 V_{BI} 求二阶导数以判断直流偏置点是最小点还是最大点：

$$\frac{\partial^2(P_{\mathrm{I}}(t))}{\partial V_{\mathrm{BI}}^2}=-\frac{kP_{\mathrm{i}}}{4}\left(\frac{\pi}{V_{\pi}}\right)^2\cos\left(\pi\frac{V_{\mathrm{RFI}}(t)+V_{\mathrm{BI}}}{V_{\pi}}\right) \tag{7}$$

直流偏置点为最大值 $P_{\mathrm{I}}(t)_{\max}$ 成立的条件为 V_{BI} 二阶导数小于 0，即

$$\frac{\partial^2(P_{\mathrm{I}}(t))}{\partial V_{\mathrm{BI}}^2}<0\rightarrow\cos\left(\pi\frac{V_{\mathrm{RFI}}(t)+V_{\mathrm{BI}}}{V_{\pi}}\right)<0 \tag{8}$$

当

$$\begin{cases}V_{\mathrm{BI}}=m\pi(m=\pm1,\pm3,\cdots)\ \text{且}\ V_{\pi}<V_{\mathrm{pp}}\leqslant2V_{\pi}\\ V_{\mathrm{BI}}=m\pi(m=0,\pm2,\cdots)\quad\text{且}\ 0<V_{\mathrm{pp}}<V_{\pi}\end{cases},$$

$P_{\mathrm{I}}(t)_{\max}$ 成立。

直流偏置点为最小值 $P_{\mathrm{I}}(t)_{\min}$ 成立的条件为 V_{BI} 二阶导数大 0，即

$$\frac{\partial^2(P_{\mathrm{I}}(t))}{\partial V_{\mathrm{BI}}^2}>0\rightarrow\cos\left(\pi\frac{V_{\mathrm{RFI}}(t)+V_{\mathrm{BI}}}{V_{\pi}}\right)>0 \tag{9}$$

当 $\begin{cases}V_{\mathrm{BI}}=m\pi(m=0,\pm2,\cdots)\ \text{且}\ V_{\pi}<V_{\mathrm{pp}}\leqslant2V_{\pi}\\ V_{\mathrm{BI}}=m\pi(m=\pm1,\pm3,\cdots)\ \text{且}\ 0<V_{\mathrm{pp}}<V_{\pi}\end{cases}$，$P_{\mathrm{I}}(t)_{\min}$ 成立。

MZM 进行相位调制时，直流偏置点需要工作在零值点，即 $V_{\mathrm{BI}}=m\pi(m=\pm1,\pm3,\cdots)$，且为保证足够的输出功率，应满足 $V_{\pi}<V_{\mathrm{pp}}\leqslant2V_{\pi}$，因此在 BPSK 调制格式下，偏压控制算法的核心是保证平均输出功率最大。对于 Q 路信号，需要将其输出设为零点。

1.1.3 QPSK 调制偏压控制算法

对于正交相位调制，I 和 Q 路 MZM 直流偏置点均工作在零值点，控制算法与 BPSK 调制格式相同，考虑到外接探测器仅能够对 QM 调制器输出功率进行反馈，I 和 Q 两路 MZM 直流偏置点和 MZI 相位偏置点电压需要分时进行调整。

IQ 两路 BPSK 信号的相位差 $\Delta\phi_{\mathrm{IQ}}$ 由 MZI 干涉仪的偏置电压决定，当 $\Delta\phi_{\mathrm{IQ}}=\frac{\pi}{2}$ 时，I 和 Q 两路

正交，信号互不相关。

I 和 Q 路信号光的光场可表达为[7]

$$E_{\mathrm{I}}=A_{\mathrm{I}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\phi_{\mathrm{I}})} \tag{10}$$

$$E_{\mathrm{Q}}=A_{\mathrm{Q}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\phi_{\mathrm{Q}})} \tag{11}$$

其中，A 为光场振幅，ω 为光载波的角速度，ϕ 为光载波的初始相位。光功率与光场振幅成正比，$2P_{\mathrm{I}}=A_{\mathrm{I}}^2$，QM 调制器为单端输出，反相的另一端未输出，QM 的单端输出功率可表达为

$$P_{\mathrm{out}}=\frac{|E_{\mathrm{I}}+E_{\mathrm{Q}}|^2}{2}=\frac{kP_{\mathrm{i}}}{4}\left\{1-\frac{\cos\frac{\pi V_{\mathrm{I}}}{V_\pi}}{2}-\frac{\cos\frac{\pi V_{\mathrm{Q}}}{V_\pi}}{2}\pm 2\sin\frac{\pi V_{\mathrm{I}}}{2V_\pi}\sin\frac{\pi V_{\mathrm{Q}}}{2V_\pi}\cos(\Delta\phi_{\mathrm{IQ}})\right\} \tag{12}$$

式中，$V_{\mathrm{RFI}}(t)$和$V_{\mathrm{RFQ}}(t)$的$V_{\mathrm{pp}}=2\pi$，即符号“1”为$+\pi$，符号“0”为$-\pi$，输出功率可简化为

$$P_{\mathrm{out}}=\frac{kP_{\mathrm{i}}}{2}[1\pm\cos(\Delta\phi_{\mathrm{IQ}})]=\begin{cases}\dfrac{kP_{\mathrm{i}}}{2}[1+\cos(\Delta\phi_{\mathrm{IQ}})], & \text{当 I 路和 Q 路信号符号相同}\\ \dfrac{kP_{\mathrm{i}}}{2}[1-\cos(\Delta\phi_{\mathrm{IQ}})], & \text{当 I 路和 Q 路信号符号相反}\end{cases}$$

在实际通信过程中，I 路和 Q 路信号不相关，相同符号和相反符号将交替出现，若 $\cos(\Delta\phi_{\mathrm{IQ}})\neq 0.5\pi$，会导致功率起伏，产生交流信号。因此，要控制相位偏置电压为 0.5π，就要将输出功率的交流量控制到最小。对于正交相位调制，需要采用闭环控制算法来调整 3 个偏压，分别为 V_{BI}，V_{BQ} 和 $\Delta\phi_{\mathrm{IQ}}$。V_{BI} 和 V_{BQ} 算法是基于输出平均功率最大，$\Delta\phi_{\mathrm{IQ}}$ 的算法是基于输出功率交流量最小。由于共用一个光电探测器进行功率反馈，3 个偏压调整是分时进行的。

1.2　多制式光调制器设计

多制式光调制器系统功能如图 5 所示，主要包含供电、FPGA 及其外围电路、调制器驱动、本振激光器、光 IQ 调制器、光耦合器、光电探测器以及相应的模数、数模转换电路等。供电可实现一次电转至二次电；FPGA 实现与其他数据源的基带数据传输、激光器/调制器/调制器驱动等的控制，实现调制格式的闭环控制和切换，产生高速基带信号用于光调制；本振激光器作为高稳光源，IQ 调制器实现光调制。

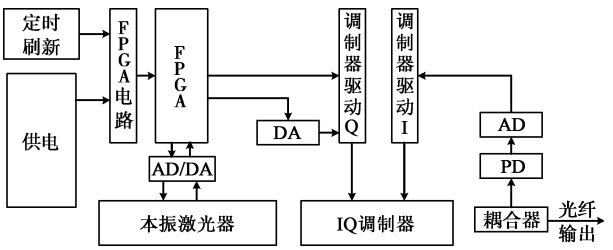


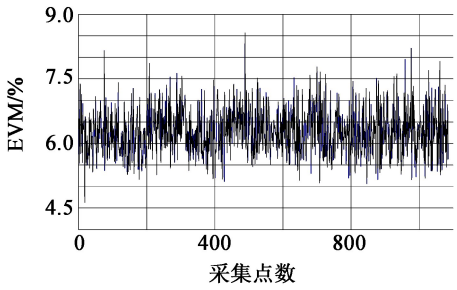
图 5　空间激光调制器功能框图

QM 调制器作为调制器的核心部分，调制格式控制及切换采用了闭环控制算法，在 IQ 调制器输出进行分路，10% 的信号接入光电探测器进行反馈，FPGA 对反馈信号进行处理，并通过 DA 输出至 IQ 调制器的三个偏压控制端口。

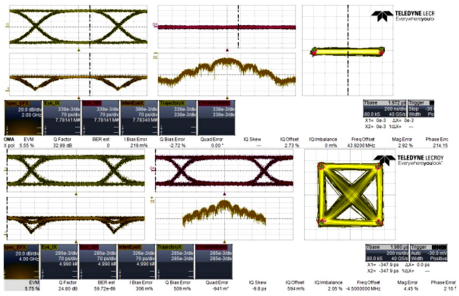
2　系统性能试验

为了验证信号光调制器的性能，首先对调制器 EVM 性能进行了测试。测试时调制器输出为 5Gb/s QPSK 信号，数据源为调制器本身产生的 15 阶伪随机码，使用力科示波器配合 Coherent Solution 公司的 OMA 设备进行。图 6 所示为 EVM 性能测试统计结果，测试时采用电脑采集示波器数据进行统计，采集间隔为 10 s，共采集约 1 100 个点(3 h)，满足实际工作条件。从统计结果可以看出，平均 EVM 为 6.3%，最大不超过 9%。

为了验证调制器在系统中的性能，将调制器与激光通信系统进行了联试。联试框图如图 7 所示，光调制器与光放大器连接并接入激光终端 A 进行发射，光放大器输出功率为 5 W。出射光通过衰减，在静态条件下，由激光终端 B 进行跟踪对准，并耦合至单模保偏光纤。光纤输出接入光低噪放，再接入光矢量信号分析仪 OMA 进行测试。图 8 所示为灵敏度 S 测试结果，接收光功率是在低噪放前端进行测试。5 Gb/s QPSK 在 -50.9 和 -47.6 dBm 下分别进行测试，估计的误码率(BER)分别为 1×10^{-4} 和 5×10^{-8}。由于调制器可以进行编码，在考虑编码条件下，接收机可以实现 1×10^{-3} 误码纠错至 1×10^{-7} 以上，因此系统实际灵敏度可达 -50.9 dBm，对应光子数为 13 每比特。该灵敏度与理论灵敏度[5]相差 3 dB 左右。考虑到低噪放噪声系数(4 dB)，OMA 采集处理误差，实际调制引入的损失小于 1 dB。



(a)



(b)

图 6 发射 EVM 性能测试(3 h)

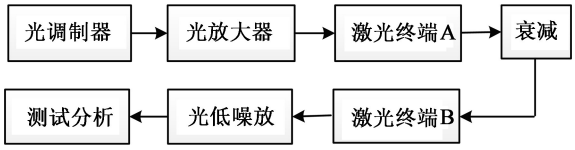


图 7 系统测试框图

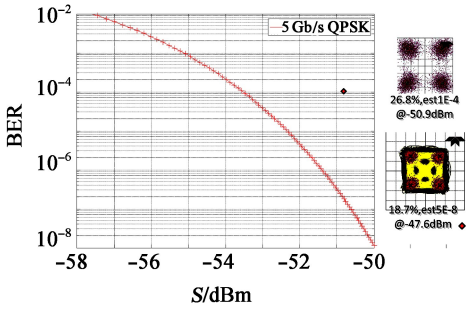


图 8 5 Gb/s 相干接收灵敏度测试结果

3 总结

本文提出了一种空间激光通信应用的多制式光调制器实现方法,采用正交相位调制器,分析了OOK,BPSK,QPSK调制格式的闭环控制算法,实现了最高速率 5 Gb/s、多种调制格式可切换的一体化光调制器。实验测试结果表明该调制器的长期 EVM 小于 9%,实际调制引入损失小于 1 dB,可为空间激光通信提供灵活的高速光信号源。限于实验条件,后续将开展基于模拟信号的幅度调制实验,验证其作为微波光子信号透明转发的功能。

参考文献:

[1] Knut Bohmer, Gregory M, Heine F, et al. Laser communication terminals for the European data relay system [J]. Proc. of SPIE, 2012, 8246: 8.

[2] Seel S, Troendle D, Heine F, et al. Alphasat laser terminal commissioning status aiming to demonstrate geo-relay for sentinel SAR and optical sensor data [C]// IGARSS IEEE Inter. Geoscience and Remote Sensing Symp., 2014.

[3] Caplan D O, Bedrosian P S, Wang J P. Expansion of multi-rate capabilities for agile DPSK lasercom transceivers [C]// Free-Space Laser Communications XXXI. 2019: 1091010.

[4] Toshiyuki Ando, Eisuke Haraguchi, Kenichi Tajima, et al. Homodyne BPSK receiver with Doppler shift compensation for inter satellite optical communication [C]// IEEE Inter. Conf. on Space Optical Systems & Applications, 2011: 279-285.

[5] Kikuchi K, Tsukamoto S. Evaluation of sensitivity of the digital coherent receiver [J]. J. of Lightwave Technol., 2008, 26(13): 1817-1822.

[6] Cho P S, Khurgin J B, Shpantzer I. Closed-loop bias control of optical quadrature modulator [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2006, 18(21): 2209-2211.

[7] Kawakami H, Yoshida E, Miyamoto Y. Auto bias control technique based on asymmetric bias dithering for optical QPSK modulation [J]. J. of Lightwave Technol., 2012, 30(7): 962-968.

[8] 李向华. 大动态范围微波光子链路的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015: 21-22.
Li Xianghua. Research on the high dynamic range microwave photonic links [D]. Nanjing: Southeast University, 2015: 21-22.

作者简介:

兰 枫(1984—),男,硕士,工程师,主要从事空间激光通信载荷研究。