

激光与光电子学进展

基于 Taylor 级数展开法的微波光子链路性能分析

张籽畅¹, 叶全意^{1,2*}¹南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023;²金陵科技学院网络与通信工程学院, 江苏 南京 211169

摘要 基于 Taylor 级数展开法对微波光子链路的性能进行分析。为了提高对微波光子链路理论分析的精确性,该方法基于 Taylor 级数和调制系数分析了 Taylor 级数展开法的适用范围。结果表明,当调制系数 m 在 0~1.74 范围时, Bessel 函数展开法计算的平均峰值比实验数据高 5~6 dB, 而 Taylor 级数展开法计算的平均峰值比实验数据高 1~2 dB, 更接近理论计算结果。

关键词 光通信; 微波光子链路; Taylor 级数展开; 调制系数; 增益

中图分类号 TN913.7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2106001

Performance Analysis of Microwave Photonic Link Based on Taylor Series Expansion Method

Zhang Zichang¹, Ye Quanyi^{1,2*}

¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

²College of Network and Communication Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, Jiangsu, China

Abstract In this paper, the performance of microwave photonic link is analyzed based on Taylor series expansion method. In order to improve the accuracy of theoretical analysis of microwave photonic link, this method analyzes the application range of Taylor series expansion method based on the Taylor series and the modulation coefficient. The results show that when the modulation coefficient m is in the range of 0~1.74, the average peak value calculated by Bessel function expansion method is 5~6 dB higher than the experimental data, while the average peak value calculated by Taylor series expansion method is 1~2 dB higher than the experimental data, which is closer to the theoretical calculation results.

Key words optical communications; microwave photonic link; Taylor series expansion; modulation coefficient; gain

1 引言

随着移动数据量的快速增长,微波光子链路在 5G 通信以及下一代移动通信中扮演着越来越重要的角色。微波光子链路具有带宽高、质量轻、传输损耗低、抗电磁干扰能力强以及相位线性度好等优点,在微波信号的发生、传输和处理等方面都有很大的优势^[1-4]。目前,微波光子链路被广泛应用于雷达、射电天文学、超宽室内无线接入和物联网领域,在电子对抗、传感网络、仪器仪表测试和生物医学等领域中也有着广阔的应用前景。

基于数学方法的计算过程是微波光子链路理论研

究中的重要步骤之一。传统对微波光子链路的计算过程往往基于 Bessel 函数展开法^[5-10],再从链路的增益、噪声系数和无杂散动态范围等性能参数进行理论分析,用数学计算得到的近似结果作为评判链路性能优劣的理论依据。但 Bessel 函数展开法在低阶展开时的精度不高,计算时存在一定的误差,高阶展开时的计算过程又较为复杂。针对该问题,本文以相位调制微波光子链路的增益计算过程为例,对比了 Taylor 级数展开法与 Bessel 函数展开法的计算结果。此外,还引入调制系数作为计算过程中的重要参数,并给出了 Taylor 级数展开法适用的调制系数范围。

收稿日期: 2021-10-21; 修回日期: 2021-10-31; 录用日期: 2021-11-05

基金项目: 江苏省博士后科研基金(1701073B)、江苏省自然科学基金综合项目(BK20171114)、金陵科技学院基金(jit-flxm-201606)

通信作者: *fjnuyqy@163.com

2 基本原理

2.1 相位调制链路模型

典型的相位调制链路模型由激光器、相位调制器、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)和探测器等器件组成,

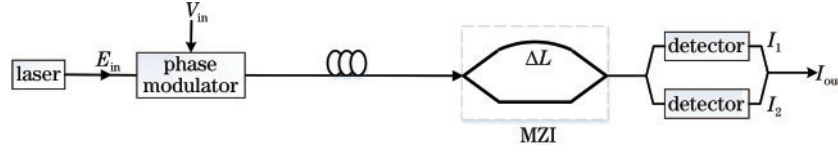


图1 相位调制链路模型的原理

Fig. 1 Principle of the phase modulated link model

激光器的输出光场可表示为

$$E_{in}(t) = \exp(i\omega_0 t), \quad (1)$$

式中: ω_0 为光载波的频率; t 为时间。若 V_{rf} 为输入信号的幅度, ω_{rf} 为输入信号频率, 则输入相位调制器的射频信号 V_{in} 可表示为

$$V_{in} = V_{rf} \cos(\omega_{rf} t), \quad (2)$$

射频信号 V_{in} 输入调制器产生的光信号相移可表示为

$$\phi(t) = \frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \cos \omega_{rf} t, \quad (3)$$

式中, V_{π} 为调制器的半波电压。设 P_0 为输入光功率, \mathcal{R} 为光电二极管的响应度。根据链路模型得到相位调制输出方程, 将光信号相移 $\phi(t)$ 代入传递矩阵, 考虑链路中的调制器损耗 α_{ϕ} 、MZI 的损耗 α_{MZI} 和其他链路的损耗 α_{link} 时, 链路的总损耗 $\alpha_{loss} = \alpha_{\phi} \alpha_{MZI} \alpha_{link}$, 则输出光电流可表示为

$$I_{out} = \mathcal{R} \alpha_{loss} P_0 \cos \omega_0 \tau \cos \left\{ \left[\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \cos \omega_{rf}(t-\tau) \right] \cos \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \cos \omega_{rf} t \right) + \cos \omega_0 \tau \sin \left[\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \cos \omega_{rf}(t-\tau) \right] \sin \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \cos \omega_{rf} t \right) + \sin \omega_0 \tau \cos \left[\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \cos \omega_{rf}(t-\tau) \right] \sin \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \cos \omega_{rf} t \right) - \sin \omega_0 \tau \sin \left[\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \cos \omega_{rf}(t-\tau) \right] \cos \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \cos \omega_{rf} t \right) \right\}, \quad (4)$$

式中, $\pi V_{rf}/V_{\pi}$ 为研究过程中的重要参数, 将其设为调制系数 m 。令 MZI 工作在正交偏置点, 即 $\omega_0 \tau = \frac{(2n+1)\pi}{2}$, 其中, n 为正整数。将调制系数 m 代入式(4), 得到

$$I_{out} = \mathcal{R} \alpha_{loss} P_0 \sin \left[2m \sin \omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \sin \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \right]. \quad (5)$$

2.2 基于 Taylor 级数展开的理论分析

根据 Taylor 公式 $\sin x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1}$, 将式(5)展开到五阶, 得到

$$I_{out} = \mathcal{R} \alpha_{loss} P_0 \left\{ 2m \sin \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) + \frac{1}{3} m^3 \sin^3 \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \left[3\omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] + \frac{1}{60} m^5 \sin^5 \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \left[5\omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] - m^3 \sin^3 \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \left[\omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] + \frac{1}{3} m^5 \sin^5 \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \left[\omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] - \frac{1}{12} m^5 \sin^5 \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \left[3\omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

用 Bessel 函数将式(5)展开到五阶, 得到

$$I_{out} = \mathcal{R} \alpha_{loss} P_0 \left\{ 2m \sin \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) + \frac{1}{3} m^3 \sin^3 \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \left[3\omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] + \frac{1}{60} m^5 \sin^5 \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \left[5\omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

根据式(7)、式(8)计算出 Taylor 级数展开法与 Bessel 函数展开法输出的差值, 可表示为

$$\Delta I_{out} = m^3 \sin^3 \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) - \frac{1}{3} m^5 \sin^5 \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \left[\omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] + \frac{1}{12} m^5 \sin^5 \frac{\omega_{rf} \tau}{2} \sin \left[3\omega_{rf} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right]. \quad (8)$$

链路性能参数均与输出电流均值的平方 $\langle I_{out} \rangle^2$ 相关, 在峰值处 $\sin \frac{\omega_{rf} \tau}{2} = 1$, 计算结果与链路调制系数 m

有关, 根据电路功率的叠加定理得到两种方法计算的电流均值平方差为

$$\Delta \langle I_{out} \rangle^2 = -2m^4 + \frac{7}{6} m^6 - \frac{13}{36} m^8 + \frac{17}{288} m^{10}. \quad (9)$$

根据式(9)仿真得到 $\Delta \langle I_{\text{out}} \rangle^2$ 与 m 的关系曲线如图 2 所示。可以发现:当 $0 < m < 1.45$ 时, Taylor 级数展开法计算的结果小于 Bessel 函数展开法, 且差值从 0 开始缓慢增大; 当 $m > 1.45$ 时, 两种方法计算结果的

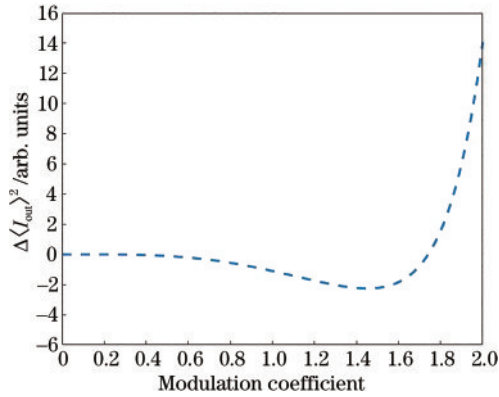


图 2 两种方法计算结果差值与调制系数 m 的关系

Fig. 2 Relationship between the difference between calculation results of two methods and modulation coefficient m

$$G = \frac{2\mathcal{R}^2 \alpha_{\text{loss}}^2 P_0^2 R_{\text{in}} R_{\text{out}}}{V_{\text{rf}}^2} \left(2m^2 \sin^2 \frac{\omega_{\text{rf}} \tau}{2} - 2m^4 \sin^4 \frac{\omega_{\text{rf}} \tau}{2} + \frac{11}{9} m^6 \sin^6 \frac{\omega_{\text{rf}} \tau}{2} - \frac{13}{36} m^8 \sin^8 \frac{\omega_{\text{rf}} \tau}{2} + \frac{71}{1200} m^{10} \sin^{10} \frac{\omega_{\text{rf}} \tau}{2} \right). \quad (12)$$

基于上述理论推导, 结合激光器、调制器以及探测器等器件的关键参数, 得到链路增益随射频电压频率变化的关系。表 1 为光链路中关键元器件的主要参数。

表 1 微波光子链路关键元器件的参数

Table 1 Parameters of key components of microwave photonic link

Parameter	Value
Responsivity / (A · W ⁻¹)	0.4
Loss of modulator / dB	3
Loss of MZI / dB	3
Loss of other link / dB	3
Half-wave voltage / V	2.9
RF signal voltage / V	1.5
Input laser power / dBm	15
Input/output impedance / Ω	50

由图 2 可知, 通过改变半波电压可实现对调制系数的调控, 进而得到延迟时间 $\tau = 100$ ps 时, 4 个不同调制系数下 Taylor 级数展开与 Bessel 函数展开的仿真结果, 如图 3 所示。可以发现: 当 $0 < m < 1.74$ 时, Taylor 级数展开法计算的峰值小于 Bessel 函数展开法; 当 $m = 1.80$ 时, Taylor 级数展开法计算的峰值大于 Bessel 函数展开法, 这与图 2 中的结果一致。此外, 根据式(7)~式(9)可知, 由于计算时各分量中正弦值系数的存在, Taylor 级数展开法在 3 dB 带宽处的计算结

果小于 Bessel 函数展开法。果小于 Bessel 函数展开法。

3 分析与讨论

链路增益是链路的基本性能指标, 光纤链路损耗、调制器损耗、探测器响应度都会对其产生影响。此外, 链路增益还与激光器和探测器的匹配阻抗、链路负载有很大的关系。定义微波光子链路的增益为输入输出功率的比值, 可表示为

$$G = P_{\text{rf, out}} / P_{\text{rf, in}}, \quad (10)$$

式中: $P_{\text{rf, in}} = V_{\text{rf}}^2 / (2R_{\text{in}})$ 为链路中的射频输入功率; $P_{\text{rf, out}} = I_{\text{out}}^2 R_{\text{out}}$ 为射频输出功率。将输入输出功率代入式(10), 得到

$$G = 2 \langle I_{\text{out}} \rangle^2 R_{\text{in}} R_{\text{out}} / V_{\text{rf}}^2, \quad (11)$$

将式(4)代入式(11), 得到

果小于 Bessel 函数展开法。

根据表 1 中光链路关键元器件的主要参数, 以调制系数 $m = 1.60$ 为例进行仿真。搭建的实验链路将激光器输出端接入相位调制器, 输入正弦射频信号, 经相位调制后的信号经 3 dB 耦合器输入 MZI, 再经过 3 dB 耦合器输入两个光电探测器进行平衡探测, 链路末端接入频谱分析仪, 最后将频谱分析仪得到的数据导出, 并结合计算结果进行对比分析。在 MZI 延时时间 $\tau = 100$ ps 时得到链路的频率响应归一化测量结果, 如图 4 所示。可以发现, 在峰值处 Bessel 函数展开法计算的链路增益比 Taylor 级数展开法约高 4 dB, Bessel 函数展开法计算的结果与实验数据的平均峰值差为 5~6 dB, 而 Taylor 展开法得到的峰值结果更精确, 与实验数据的平均峰值差为 1~2 dB。

更换不同型号的 MZI, 使链路中 MZI 的差分延时 $\tau = 375$ ps, 得到链路的频率响应归一化测量结果如图 5 所示。可以发现: Bessel 函数展开法计算的链路增益峰值比 Taylor 级数展开法约高 4 dB; 在峰值处, Bessel 函数展开法的计算结果比实验数据约高 5 dB, Taylor 级数展开法计算的结果与实验数据的差值为 1~2 dB。这表明 Taylor 级数展开法可以计算出更精确的峰值。

综上所述, 当 $m = 1.60$ 时, Bessel 函数展开法的计算结果大于 Taylor 级数展开法, 这与式(9)得到的输出差值相吻合, 且 Taylor 级数展开法的峰值计算结果更精确。其中, 实验结果增益的减小主要是由光电二

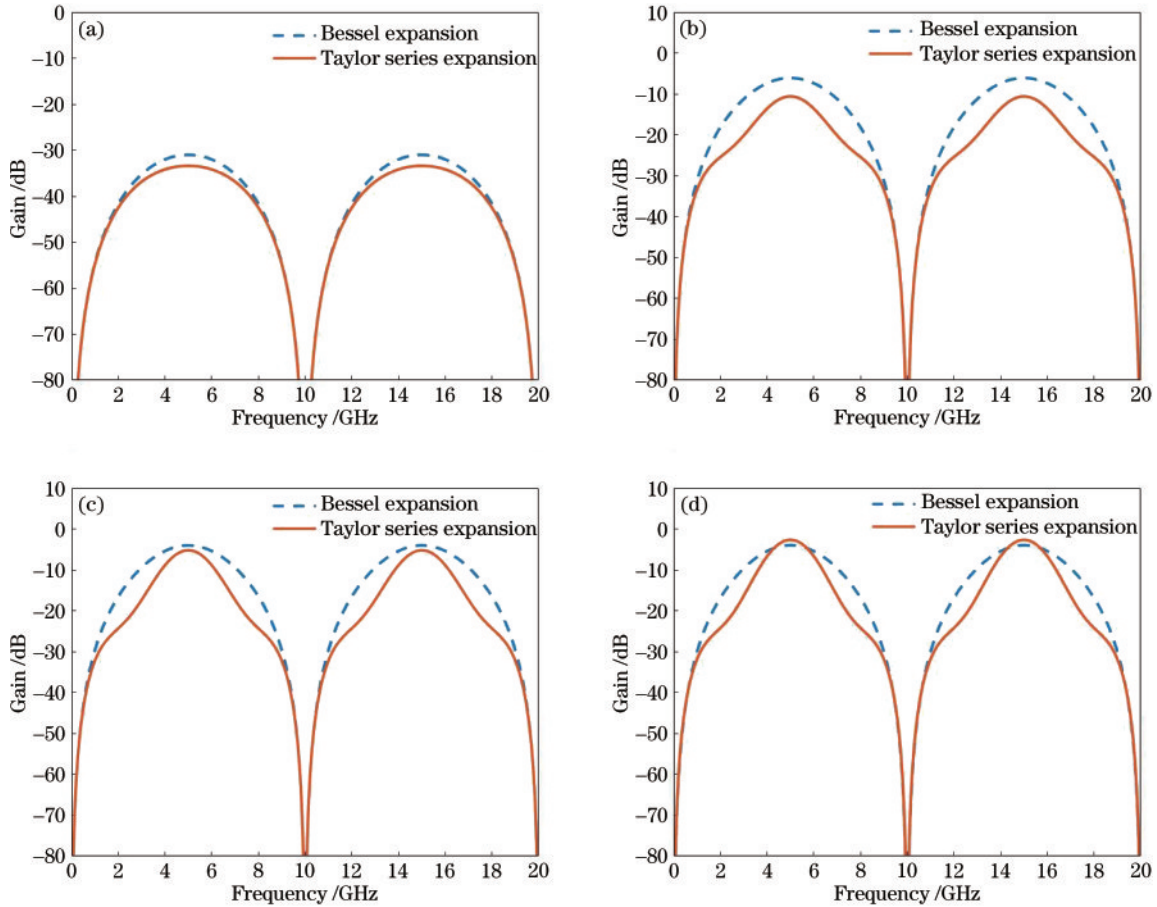


图 3 不同调制系数下的仿真结果。(a) $m = 0.50$; (b) $m = 1.60$; (c) $m = 1.74$; (d) $m = 1.80$

Fig. 3 Simulation results under different modulation coefficients. (a) $m = 0.50$; (b) $m = 1.60$; (c) $m = 1.74$; (d) $m = 1.80$

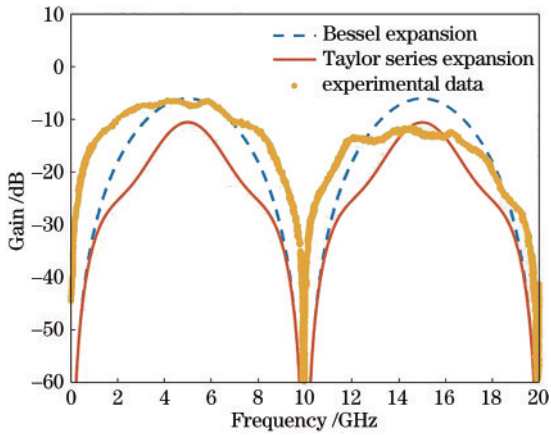


图 4 $\tau = 100$ ps 时小信号增益随频率的变化曲线^[6]

Fig. 4 Variation curve of small signal gain with frequency when $\tau = 100$ ps^[6]

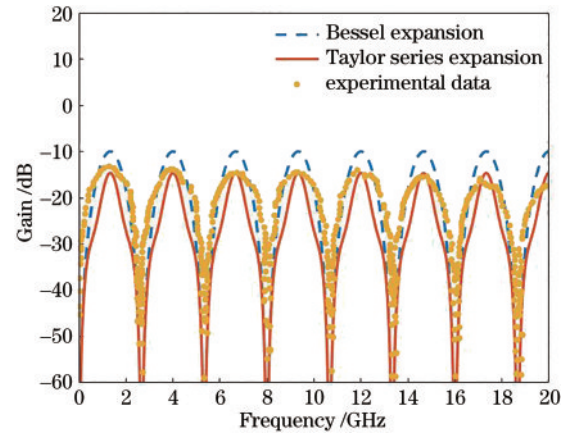


图 5 $\tau = 375$ ps 时小信号增益随频率的变化曲线^[7]

Fig. 5 Variation curve of small signal gain with frequency when $\tau = 375$ ps^[7]

极管的频响特性造成,即随着信号频率的增大,实际响应度会逐渐降低。

4 结 论

提出一种基于 Taylor 级数展开的分析方法。以调制系数 m 作为分析过程中的重要参数,重点研究了 $0 < m < 1.80$ 时链路的增益。仿真与实验结果表明,

在 MZI 时延 $\tau = 100$ ps 和 $\tau = 375$ ps 的情况下,当 $0 < m < 1.74$ 时, Bessel 函数展开法计算的峰值比实验数据平均高 5~6 dB,而 Taylor 级数展开法计算的峰值与实验数据的差值为 1~2 dB,表明 Taylor 级数展开法在峰值处的计算结果更精确。这种基于 Taylor 级数展开法的微波光子链路可应用于其他理论研究过程,进一步提高链路噪声系数、动态范围等参数的计

算精度。

参 考 文 献

- [1] Yao J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [2] 肖永川, 王超, 张浩, 等. 光放大器对光载微波信号传输效率的改善[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 995-1000.
Xiao Y C, Wang C, Zhang H, et al. Improvement of transmission efficiency in microwave photonic links using EDFA[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 995-1000.
- [3] 赵峰, 蔡卫童, 张龙龙, 等. 基于平衡探测的微波光子链路线性化分析[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1104001.
Zhao F, Cai W T, Zhang L L, et al. Linearization analysis of microwave photonic link based on balanced detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1104001.
- [4] 陈华, 邹喜华, 于歌, 等. 直调与外调型微波光子链路线性度的实验研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1106002.
Chen H, Zou X H, Yu G, et al. Experimental study on linearity of microwave photonic link with direct modulation or external modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1106002.
- [5] Singley J M, Urlick V J, Diehl J F, et al. Increased performance of single-channel analog photonic links enabled by optical wavelength-division multiplexing[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(3): 1274-1282.
- [6] Urlick V J, Bucholtz F, McKinney J D, et al. Long-haul analog photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(8): 1182-1205.
- [7] Liu G J, Daulay O, Tan Q G, et al. Linearized phase modulated microwave photonic link based on integrated ring resonators[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38603-38615.
- [8] 刘元, 李晶, 贺永娇, 等. 基于双平行马赫-曾德尔调制器和平衡光电探测器的四倍频可调对称三角形函数波形信号发生器[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1906005.
Liu Y, Li J, He Y J, et al. Generator of signals with quadruple frequency and triangular waveform tunable in symmetry based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator and balanced photodetector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1906005.
- [9] 张昆, 赵尚弘, 蒋炜, 等. 基于光偏振复用调制的可重构三角波和方波产生的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 170603.
Zhang K, Zhao S H, Jiang W, et al. Reconfigurable triangular and square waveforms generation using optical polarization division modulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 170603.
- [10] Li S M, Cong R, He Z Q, et al. Switchable microwave photonic filter using a phase modulator and a silicon-on-insulator micro-ring resonator[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(5): 052501.