

基于级联 MZM 光学回路产生高性能微波频率梳

张丰**, 李培丽*, 刘阳, 沈聪

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

摘要 为产生高性能微波频率梳(MFC),基于级联马赫-曾德尔调制器(MZM)光学回路系统,提出一种利用光梳外差法产生可调谐 MFC 的方案。将连续光通过耦合器注入到级联 MZM 光学回路中调制,最终产生光学频率梳(OFC),再将生成的 OFC 在光电探测器中拍频获得 MFC。对该方案建立了理论模型,利用光通信系统设计软件 Optisystem 研究了光源功率、光源线宽和射频驱动信号(RF)频率等参数对输出 MFC 的性能的影响。结果表明,合理地调节光源、RF 等器件参数,可以获得带宽为 300 GHz、平坦度为 0.12 dB、功率达 22.49 dBm 的 MFC。该方案结构简单,易于实现,通过调节 RF 信号的频率,就可以得到梳距可调谐的 MFC。

关键词 激光器;微波频率梳;可调谐;级联马赫-曾德尔调制器;光学回路

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1101006

High-Performance Microwave Frequency Comb Based on Cascaded MZM Optical Loop

Zhang Feng**, Li Peili*, Liu Yang, Shen Cong

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

Abstract To produce a high-performance microwave frequency comb (MFC), a tunable MFC generating scheme using optical comb heterodyning is proposed based on a cascaded Mach-Zehnder modulator (MZM) optical loop system. Continuous light injected through the coupler into the cascade MZM optical loop for modulation can generate an optical frequency comb (OFC), which beats in the photoelectric detector to produce MFC. A theoretical model is created to simulate the system. The influences of the light source power, light source line width, radio frequency driving signal (RF) frequency, and other parameters on the final MFC performance are studied with the optical communication system design software Optisystem. Results show that the output MFC generated by properly adjusting the parameters of the light source, RF, and other devices has a 300-GHz bandwidth, with flatness of 0.12 dB and power reaching up to 22.49 dBm. The scheme is structurally simple and easy to implement, while additionally obtaining a comb-tunable MFC when the RF signal frequency is adjusted.

Key words lasers; microwave frequency comb; tunable; cascaded Mach-Zehnder modulator; optical loop

OCIS codes 060.4510; 060.4080; 130.0250

1 引言

微波频率梳(MFC)由一系列频率间隔相等的离散微波信号构成,可以在一个连续频率带宽范围内同时提供若干个不同频率的微波信号,它不仅兼具微波信号的似光性、穿透性、非电离性和信息性等特点,而且相较于单频微波信号具有更宽的频带宽度,在无线通信、雷达制导、传感、遥感探测等领域^[1-5]均有重要的应用价值,因此 MFC 具有十分广

阔的发展前景。

目前,国内外产生 MFC 的方法主要有两大类:电学方法^[6-8]和光学方法^[9-16]。传统的基于电学方法获得 MFC 的技术已趋于成熟,数字化技术的加入使其灵活性和集成性得到了进一步的提升,但是受电子带宽瓶颈的限制,带宽仅可以达到几十 GHz,很难向更高频带扩展,并且所产生频率梳的梳距不易灵活调节,导致其应用受到较大限制。而基于光学方法产生的 MFC 能够突破电子带宽瓶颈,

收稿日期: 2019-05-16; 修回日期: 2019-06-14; 录用日期: 2019-07-15

* E-mail: lip@njupt.edu.cn; ** E-mail: 2762196983@qq.com

相比于采用电学方法获得的 MFC 具有带宽大、功率高和载噪比高等优点。基于光学方法产生 MFC 的方法主要有光梳外差法、基于扫描隧道显微镜 (STM) 隧道结的非线性效应法、基于锁模激光器的模式锁定法和基于半导体激光器的非线性动力学态法。而基于光梳外差法,再用光电探测器 (PD) 拍频产生的 MFC 具有结构稳定、易调谐等优点,受到了格外的关注。在文献[10-14]中,所产生的 MFC 功率较低,带宽过窄,信噪比低,梳距不可调谐;在文献[15-16]中,尽管产生的 MFC 带宽达到 300 GHz,并且梳距在 5~20 GHz 范围内可调谐,但平坦度不是太理想。

本文基于级联 MZM 结构的光学回路,提出一种产生高性能可调谐 MFC 的方案。该方案利用两个级联 MZM 对光学回路的光进行调制,最终产生了带宽大、稳定度较高的光学频率梳 (OFC),再将生成的 OFC 信号注入到 PD 中拍频产生 MFC。利用光通信系统设计软件 Optisystem 对该方案产生的 MFC 的平坦度、功率和间距等参数进行仿真研究。本文生成 MFC 的高性能体现在无论是功率还是信噪比,都高于所述参考文献,且在 300 GHz 的带宽内梳线具有较高的平坦度和梳距间隔可调谐等优点。

2 基本原理

2.1 系统模型

基于级联 MZM 回路产生高性能 MFC 的系统结构如图 1(a) 所示。两个级联 MZM、耦合器 (OC)、带通滤波器 (BPF)、光学时延和掺饵光纤放

大器 (EDFA) 构成了一个光学回路。光学回路的核心部件为两个级联 MZM,它们被频率为 Δf 的射频信号 (RF) 驱动,并且驱动两个 MZM 的射频信号的相位差由相移器 (PS) 调节。精确调节 MZM 两臂的偏置电压,可以使其工作在最小传输点,当光被其调制时,能获得奇数阶边带;调节加载在 MZM 两臂的 RF 信号电压 V_{DC1} 、 V_{DC2} ,使其在小信号调制下,可以抑制高阶边带^[17]。此时当光被调制时,只有正、负一阶边带输出^[18]。本研究中两个级联 MZM 均工作在上述条件下。可调谐激光源 CW 发出频率为 f_0 的连续光,经过 OC 输入到回路中,通过 MZM1 时,输出的光谱仅包含频率为 $f_0 - \Delta f$ 和 $f_0 + \Delta f$ 的正、负一阶边带。这两根谱线输入到 MZM2,输出信号包含载波和正、负二阶边带。通过调节 PS 的参数,可以抑制载波,使得 MZM2 的输出信号只包含频率为 $f_0 - 2\Delta f$ 和 $f_0 + 2\Delta f$ 的正、负二阶边带,见图 1(b) 中的 output 1。这两根谱线由 EDFA 放大至种子光源水平,与种子光通过 OC 耦合,再次注入到回路中,经过级联 MZM,可以获得频率为 $f_0 - 4\Delta f$ 、 $f_0 - 2\Delta f$ 、 f_0 、 $f_0 + 2\Delta f$ 、 $f_0 + 4\Delta f$ 的 5 根光谱,见图 1(b) 中的 output 2。光谱每经过一次光学回路,就会增加两条谱线,向两边展宽。经过 n 次循环,利用光谱分析仪 (OSA) 可以观察到频率间隔为 $2\Delta f$ 的 OFC,如图 1(b) 中的 output n 所示。将生成的 OFC 从 OC 的另一个输出端口注入到 PD 中拍频,利用电子频谱分析仪 (ESA) 观察得到生成的 MFC 频率间隔为 $2\Delta f$ 。通过调节 RF 的频率,就可以获得梳距可调谐的 MFC。

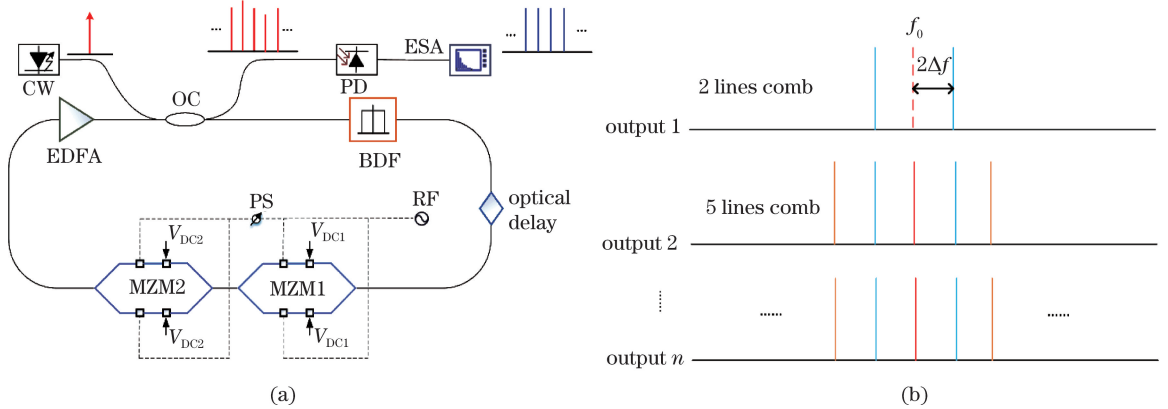


图 1 基于级联 MZM 光学回路产生高性能 MFC 的示意图。(a) 系统结构;(b) 光学回路中光谱生成原理

Fig. 1 Diagram of high-performance MFC based on a cascaded MZM optical loop. (a) System structure; (b) principle of spectrum generation in optical loop

2.2 理论分析

CW 发出的种子光作为光载波信号被输入到回

路中,其电场 $E_{in}(t)$ 可表示为

$$E_{in}(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t), \quad (1)$$

式中: E_0 表示输入光信号幅值; ω_0 表示光载波的角频率; t 为信号传输时间。设加载到两个波导臂的电压分别为

$$\nu_1(t) = V_{\text{bias1}} + V_1 \cos(\omega_{m1}t), \quad (2)$$

$$\nu_2(t) = V_{\text{bias2}} + V_2 \cos(\omega_{m2}t), \quad (3)$$

式中: V_{bias1} 、 V_{bias2} 分别表示上、下光波导臂加载的直流偏置电压; V_1 、 V_2 为调制微波信号的幅值; ω_{m1} 、 ω_{m2} 分别为驱动上、下光波导臂射频信号的角频率。两臂上产生的相位变化分别为

$$\phi_1(t) = \frac{\pi\nu_1(t)}{V_{\pi1}} = \frac{\pi V_{\text{bias1}}}{V_{\pi1}} + \frac{\pi V_1}{V_{\pi1}} \cos(\omega_{m1}t), \quad (4)$$

$$\phi_2(t) = \frac{\pi\nu_2(t)}{V_{\pi2}} = \frac{\pi V_{\text{bias2}}}{V_{\pi2}} + \frac{\pi V_2}{V_{\pi2}} \cos(\omega_{m2}t), \quad (5)$$

式中: $V_{\pi1}$ 、 $V_{\pi2}$ 为两干涉臂的半波电压。一般情况下上、下两臂的半波电压相同, 调制信号角频率也相同, 即 $V_{\pi1} = V_{\pi2} = V_{\pi}$, $\omega_{m1} = \omega_{m2} = \omega_m$ 。为了在调制中避免引起调制啁啾, 令 MZM 调制器工作在推挽模式 ($V_0 = V_1 = -V_2$)。两个调制臂上加载的调制信号分别为

$$\nu_1(t) = V_0 \cos(\omega_m t), \quad (6)$$

$$\nu_2(t) = -V_0 \cos(\omega_m t + \theta), \quad (7)$$

式中: θ 为两臂调制信号的相位差。

当种子光通过 MZM1 时, 输出光信号为

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) \exp\left\{j \left[\frac{\phi_1(t) + \phi_2(t)}{2} \right]\right\} \cos\left[\frac{\Delta\phi(t)}{2} \right] = E_{\text{in}}(t) \exp\left\{j \left[\frac{\phi_1(t) + \phi_2(t)}{2} \right]\right\} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(\beta) \exp[jn(\omega_m t + \theta)], \quad (8)$$

式中: $\beta = \pi V_0 / V_{\pi}$ 为调制深度; V_{π} 为半波电压; $\Delta\phi(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t)$ 为上、下两臂的相位差; $J_n(\beta)$ 为第一类 n 阶贝塞尔函数。

当 $\beta \ll \pi/6$ 时, 可视为小信号调制, 高阶项可以被忽略掉。当 $\Delta\phi = \pi$ 、 $\theta = 0$ 时, MZM 偏置在最小传输点, 偶数阶边带被完全抑制, 只考虑正、负一阶两个边带, 此时 MZM1 输出端的信号为

$$E_1(t) \propto E_0 J_1(\beta_1) \{ \sin[(\omega_0 - \omega_m)t - \Phi_1] + \sin[(\omega_0 + \omega_m)t + \Phi_1] \}, \quad (9)$$

式中: β_1 为 MZM1 的调制深度; Φ_1 为加载在 MZM1 上的 RF 信号的初始相位。

MZM1 的输出光信号进入 MZM2, 高阶分量由于幅值较小可以被忽略掉, 故只存在载波和两个二阶分量。MZM2 输出端的光信号为

$$E_2(t) \propto E_0 J_1(\beta_1) J_1(\beta_2) \cdot$$

$$\{ \cos[(\omega_0 - 2\omega_m)t + \phi - \Phi_1 - \Phi_2] + \cos(\omega_0 t + \phi - \Phi_1 + \Phi_2) + \cos(\omega_0 t + 2\phi + \Phi_1 - \Phi_2) + \cos[(\omega_0 + 2\omega_m)t + 2\phi + \Phi_1 + \Phi_2] \}, \quad (10)$$

式中: β_2 为 MZM2 的调制深度; Φ_2 为加载在 MZM2 上的 RF 信号的初始相位; ϕ 为 PS 所产生的相位差。

若调节进入 MZM1 和 MZM2 的 RF 信号的初始相位, 使得相位满足条件 $(\phi + 2\Phi_1 - 2\Phi_2)/2 = (2k+1)\pi$ 时, 载波也会被抑制掉, 故而(4)式可简化为

$$E_2(t) \propto E_0 J_1(\beta_1) J_1(\beta_2) \cdot \{ \cos[(\omega_0 - 2\omega_m)t + \phi - \Phi_1 - \Phi_2] + \cos[(\omega_0 + 2\omega_m)t + 2\phi + \Phi_1 + \Phi_2] \}. \quad (11)$$

由(11)式可知, MZM2 的输出信号只包含正、负二阶边带, 其电场的表达式可简写为

$$E_3(t) = 2\cos(2\Delta\omega t) K E_0 \exp(j\omega_0 t), \quad (12)$$

式中: $\Delta\omega$ 表示射频驱动信号 RF 的角频率; K 表示耦合器的耦合系数。

假设 EDFA 的放大倍数为 B , 并且可调谐带通滤波器(BPF)能够滤除回路中 EDFA 引入的自发辐射(ASE)噪声, 回路的损耗系数为 L , 那么谱线经过 EDFA 即种子光经过一次回路输出的电场表达式为

$$E_{1,1}(t) = 2KBL E_0 \exp(j\omega_0 t) \cos(2\Delta\omega t). \quad (13)$$

回路中第一次生成的谱线与种子光源耦合, 作为第二次回路的输入光, 其电场可表示为

$$E_{2,0}(t) = K E_0 \exp(j\omega_0 t) + 2K^2 B L E_0 \exp(j\omega_0 t) \cos(2\Delta\omega t). \quad (14)$$

经过级联 MZM 调制、EDFA 放大之后, 种子光经过两次回路输出的电场可表示为

$$E_{2,1}(t) = 2KBL \cos(2\Delta\omega t) E_0 \exp(j\omega_0 t) + 2^2 K^2 B^2 L^2 \cos^2(2\Delta\omega t) E_0 \exp(j\omega_0 t). \quad (15)$$

因此, 当种子光经过 n 次回路生成的谱线与种子光耦合之后, 输出 $2n+1$ 根光谱线, 其电场可表示为

$$E_{n+1,1}(t) = 2KBL \cos(2\Delta\omega t) E_0 \exp(j\omega_0 t) + 2^2 K^2 B^2 L^2 \cos^2(2\Delta\omega t) E_0 \exp(j\omega_0 t) + \dots + 2^n K^n B^n L^n \cos^n(2\Delta\omega t) E_0 \exp(j\omega_0 t). \quad (16)$$

假设输入到 PD 的 OFC 梳线数量为 N , 根据拍频干涉原理, 第 j ($j < N$) 根微波谱线的强度可表示为

$$I_j(t) = \sum_{i=j}^N [E_{i-j}(t) + E_i(t)]^2 = \sum_{i=j}^N \{E_{i-j}^2 \cos^2(2\pi f_{i-j}t) + E_i^2 \cos^2(2\pi f_it) + E_{i-j}E_i \cos[2\pi(f_{i-j} + f_i)t] + E_{i-j}E_i \cos[2\pi(f_i - f_{i-j})t]\}, \quad (17)$$

式中： E_i 为第 i 根光梳的振幅； f_i 为第 i 根光梳的频率。

由于 PD 的截止频率远远达不到 $j(t)$ 表达式中和频项部分 $f_{i-j} + f_i$ ，在实际响应过程中，此项忽略不计。而差频项 $f_i - f_{i-j}$ 在电子学频率范围内，需考虑在内。结合分析，可以得到 PD 输出电流的表达式为

$$i(t) = R \sum_{i=1}^{N-1} I_x(t) = \frac{q\eta}{hf} \left\{ \sum_{i=2}^N \{E_{i-1}^2 + E_i^2 + E_{i-1}E_i \cos[2\pi(f_i - f_{i-1})t]\} + \sum_{i=3}^N \{E_{i-2}^2 + E_i^2 + E_{i-2}E_i \cos[2\pi(f_i - f_{i-2})t]\} + \sum_{i=4}^N \{E_{i-3}^2 + E_i^2 + E_{i-3}E_i \cos[2\pi(f_i - f_{i-3})t]\} + \dots + \{E_1^2 + E_N^2 + E_1E_N \cos[2\pi(f_N - f_1)t]\} \right\}, \quad (18)$$

式中： R 为 PD 的响应度，其表达式为 $R = \frac{q\eta}{hf}$ ， q 为电子电荷， η 为量子效率， h 为普朗克常数， f 为光波中心频率。

3 仿真与分析

利用光通信系统设计软件 Optisystem 对本方案进行仿真研究。在仿真中，设置可调谐激光源的中心频率为 193.1 THz，光功率为 -10 dBm，初始相位为 0，线宽为 0.01 MHz；RF 信号的频率为 20 GHz；电移相器相移为 90° ；PD 的响应度为

1 A/W；若无特别说明，下文中各器件的工作参数均按上述设定。由于激光器的线宽和功率、RF 信号频率和 PD 的响应度对最终输出的 MFC 性能起决定作用，故本研究着重分析这两组参数对最终产生 MFC 性能的影响。而 RF 信号的频移和 EDFA 噪声等器件本身属性对最终生成的 MFC 性能并无太大影响，在仿真中设定为固定的参数，本文不做研究。

图 2 为种子光第一次经过级联 MZM 输出的光谱图，可以看出，当种子光源第一次经过耦合器进入到环路中，受到级联 MZM 调制时，输出两根功率相等的正、负二阶边带，它们的频率间隔为 80 GHz。

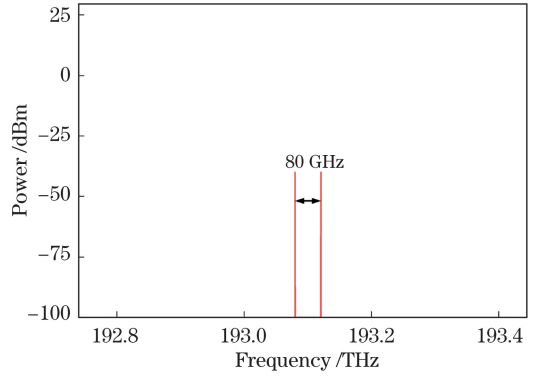


图 2 种子光第一次经过级联 MZM 的输出光谱
Fig. 2 Output spectrum of seed light passing through the cascaded MZM for the first time

图 3 为级联 MZM 光学回路稳定输出的光谱图和从 PD 端输出的对应频谱图。从图 3(a) 可以看到，回路稳定时最终输出的光谱图是一个包含 16 根梳线、频率间隔为 40 GHz 的 OFC，其平坦度为 2.39 dB，最高功率为 13.63 dBm。从图 3(b) 可以看出，PD 输出端的频谱是一个包含 7 根梳线的 MFC，有效带宽为 300 GHz，其功率变化幅值为 0.12 dB，最高功率达 22.49 dBm，载噪比为 61.13 dB。本研究所获得的 MFC 平坦度较好，功率和纯度较高。从

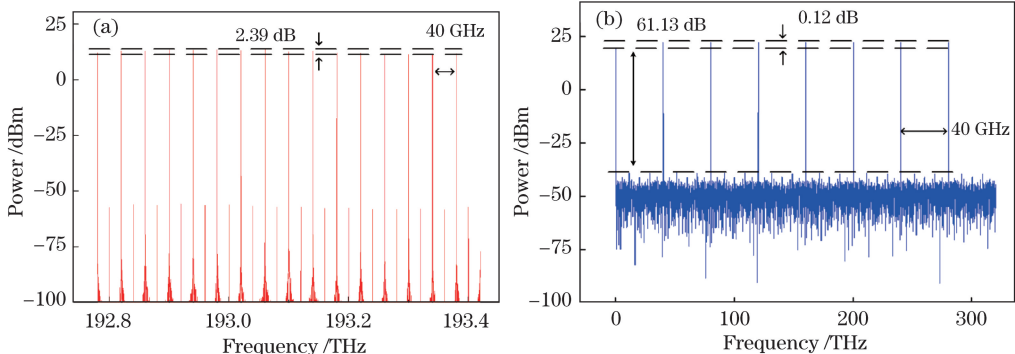


图 3 级联 MZM 光学回路稳定输出结果。(a) 光谱图；(b) 频谱图

Fig. 3 Results of stable output of cascaded MZM optical loop. (a) Spectrum; (b) spectrogram

图 3 还可以看到光谱图底部存在规则的噪声梳线, 这是因为级联 MZM 并没有将其他阶的边带完全抑制掉, 这些边带不断地经过级联 MZM 调制和 EDFA 放大, 最终显示出来。

3.1 光源功率的影响

图 4 为光源的功率依次设置为 -20 dBm、 -15 dBm 和 -10 dBm 时, 级联 MZM 光学回路稳

定输出的光谱图和从 PD 输出的对应频谱图。如图 4(a)~(c) 所示, OFC 的最大功率分别为 1.26 dBm、 4.98 dBm 和 13.63 dBm, 谱线的平坦度分别为 2.53 dB、 2.76 dB 和 2.39 dB。由图 4(a)~(c) 可知, 光源功率的增大对产生的 OFC 的平坦度并无太大影响, 但 OFC 的梳线功率和底部噪声都在增大, 且噪声增加得更加迅速。

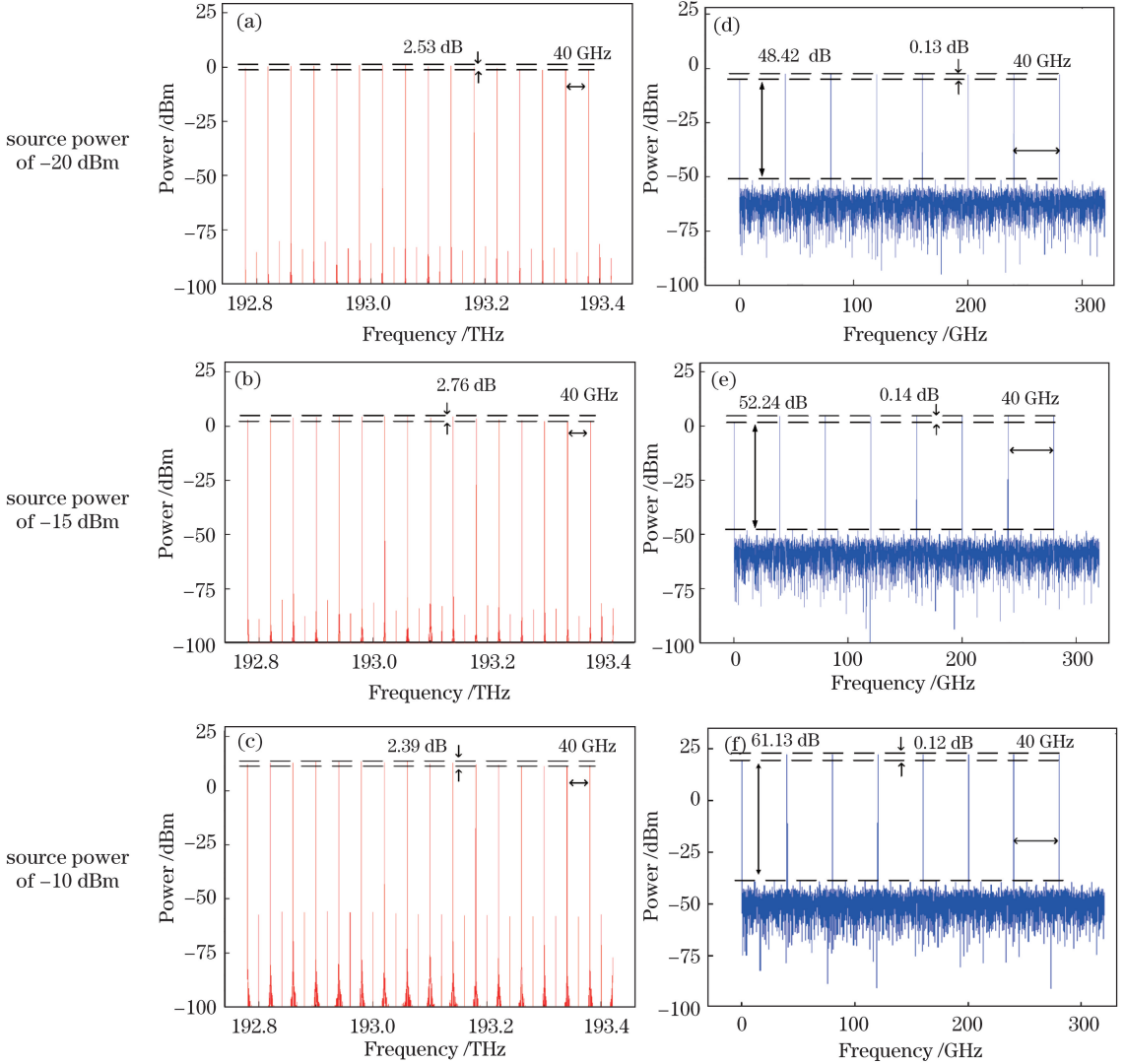


图 4 光源功率分别为 -20 dBm、 -15 dBm 和 -10 dBm 时, 级联 MZM 光学回路稳定输出的结果图。
(a)~(c) 光谱图; (d)~(f) 频谱图

Fig. 4 Results of the stable output of the cascaded MZM optical loop when the source power is -20 dBm, -15 dBm, and -10 dBm. (a)-(c) Spectra; (d)-(f) spectrograms

从 PD 端输出的对应频谱如图 4(d)~(f) 所示, MFC 的最大功率分别为 -2.50 dBm、 4.66 dBm 和 22.49 dBm, 谱线的平坦度分别为 0.13 dB、 0.14 dB 和 0.12 dB, 载噪比分别为 48.42 dB、 52.24 dB 和 61.13 dB。从图 5 可以看出, 当光源功率从 -20 dBm 开始增大时, MFC 的

平坦度在 -20 dBm 到 -5 dBm 之间, 并没有很大的波动, 并且载噪比随着光源功率的增大而增大。但随着光源功率的进一步增大, 输出 MFC 的谱线载噪比降低, 平坦度也开始变差。因此, 合理地提高光源的功率, 可以获得载噪比更高、功率更高、平坦度更好的 MFC。

3.2 光源线宽的影响

当调节光源线宽分别为 0.01, 1, 100 MHz 时, 回路稳定输出的光谱图和从 PD 端输出的对应频谱如图 6 所示。从图 6(a)~(c)可以看出, OFC 谱线的最高功率分别为 13.63 dBm、13.60 dBm 和 14.60 dBm, 平坦度分别为 2.39 dB、2.36 dB 和 4.32 dB, 载噪比分别为 69.03 dB、65.25 dB 和 39.40 dB。由图 6(a)~(c)可知, 随着线宽的增大, OFC 谱线的功率和平坦度并无太大的变化, 但其信噪比降低明显。这是因为光源线宽逐渐变宽时, 回路中的光每循环一次, 相对于线宽精细时就会积累更多的噪声干扰, 导致其信噪比变低。

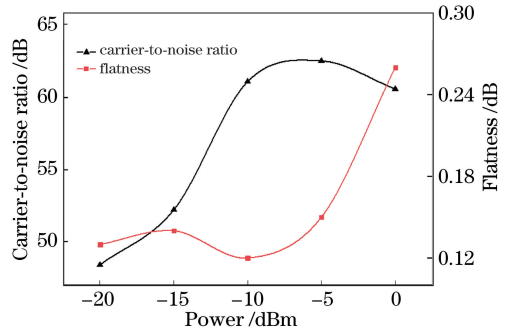


图 5 光源功率为 -20 dBm~ 0 dBm 时, MFC 的载噪比和平坦度的关系

Fig. 5 Relationship between carrier-to-noise ratio and flatness of MFC when the power of the light source is -20 dBm- 0 dBm

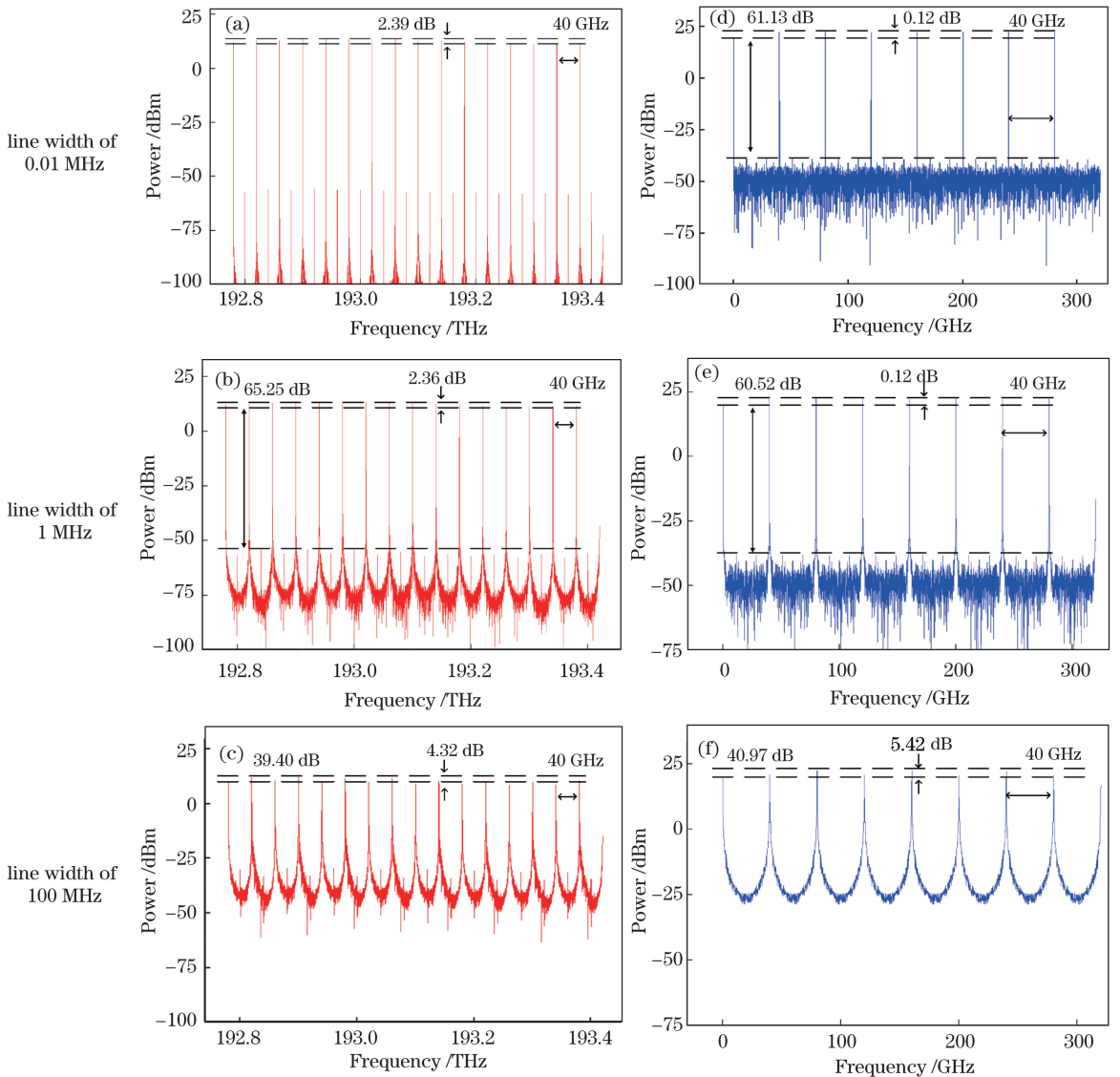


图 6 光源线宽分别为 0.01, 1, 100 MHz 时, 级联 MZM 光学回路稳定输出结果。(a)~(c)光谱图; (d)~(f)频谱图
Fig. 6 Results of the stable output of the cascaded MZM optical loop when the line width is 0.01, 1, and 100 MHz.
(a)-(c) Spectra; (d)-(f) spectrograms

从图 6(d)~(f)可以看出,MFC 谱线的最高功率分别为 22.49 dBm、22.49 dBm 和 22.51 dBm,平坦度分别为 0.12 dB、0.12 dB 和 5.42 dB,载噪比为 61.13 dB、60.52 dB 和 40.97 dB,激光器线宽的增幅较小,输出 MFC 的功率和平坦度并无太大变化,而当线宽增加到一定宽度时,MFC 谱线的平坦度相对于线宽较精细时明显变差,并且随着线宽的增加,载噪比降低。实际应用中对 MFC 的载噪比没有具体的限制,载噪比越高的 MFC 受噪声的干扰越小,信号在长距离通信中更具有优势。但是,激光器的线宽越精细,成本就越高,当载噪比和平坦度满足应用条件时,可以选择性能较低的激光器。

3.3 射频信号频率的影响

将驱动射频信号的频率分别设置为 5, 10, 20 GHz 时,级联 MZM 光学回路稳定输出的光谱图和从 PD 端输出的对应频谱如图 7 所示。从图 7(a)~(c)可以看出,OFC 谱线的最高功率分别为 13.38 dBm、12.48 dBm 和 13.63 dBm,平坦度分别为 26.0 dB、8.45 dB 和 2.39 dB。随着 RF 信号频率的增加,OFC 谱线的平坦度逐渐变好,这是因为谱线间距较小时,在相同的频段内可获得更多的光谱线,而 EDFA 的增益具有不平坦性,在相同的放大条件下,随着级联 MZM 调制次数的增加,增益大的地方所产生的梳线的功率相对于增益低的地方会越来越大。

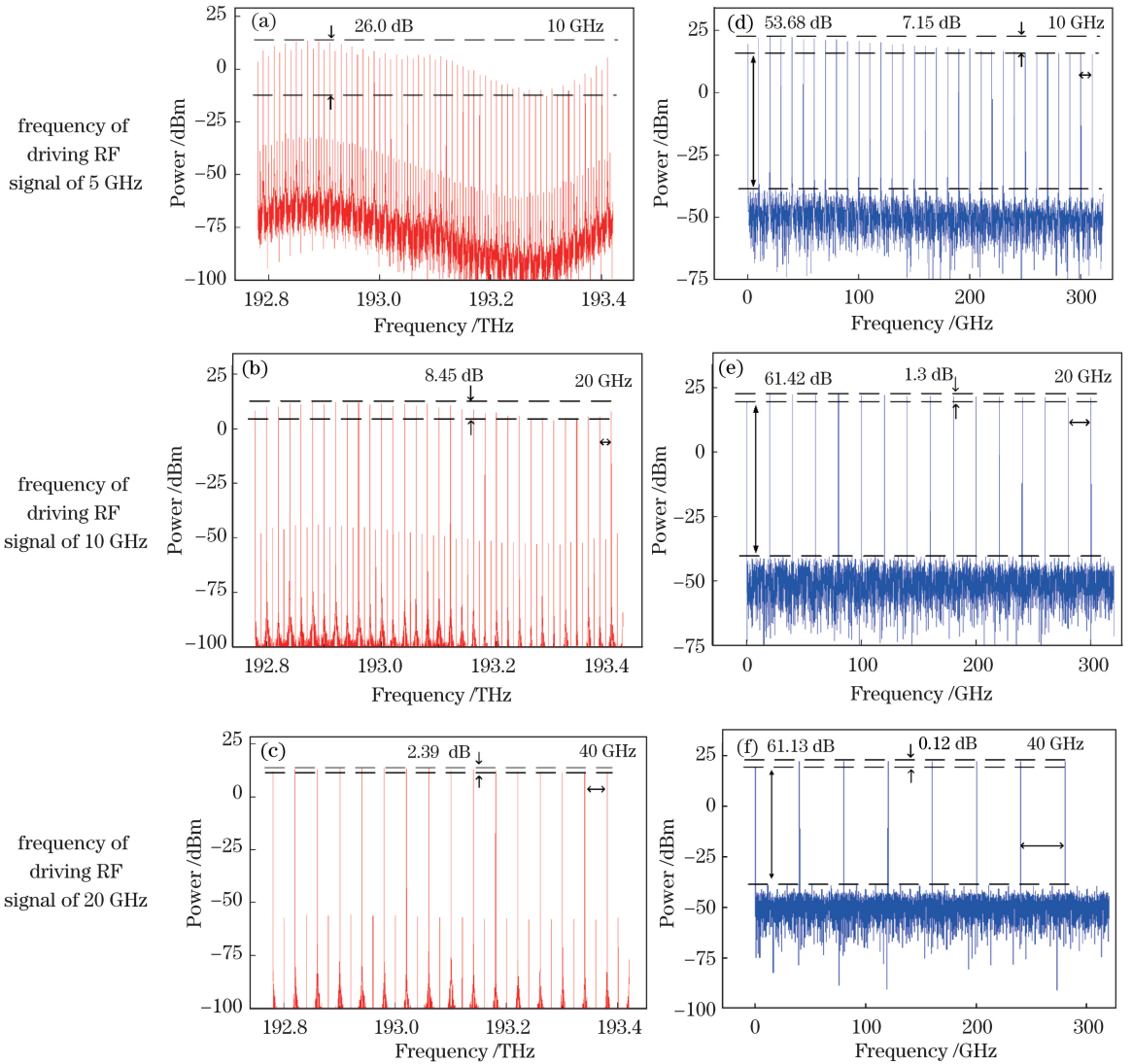


图 7 驱动射频信号频率分别为 5, 10, 20 GHz 时,级联 MZM 光学回路稳定输出结果。(a)~(c) 光谱图;(d)~(f) 频谱图
Fig. 7 Results of the stable output of the cascaded MZM optical loop when the frequency of driving RF signal is 5, 10, and 20 GHz. (a)-(c) Spectra; (d)-(f) spectrograms

从图 7(d)~(f)可以看出,MFC 谱线的最高功率分别为 22.56 dBm、22.49 dBm 和 22.49 dBm,平

坦度分别为 7.15 dB、1.3 dB 和 0.12 dB,载噪比为 53.68 dB、61.42 dB 和 61.13 dB。随着 RF 信号的频

率变大,谱线的数目减少,平坦度明显提高。当平坦度满足使用要求时,可通过调节 RF 信号的频率来获得不同间距的 MFC。

3.4 PD 响应度的影响

不同 PD 响应度时级联 MZM 光学回路稳定输出结果如图 8 所示。可以看出,MFC 谱线的最高功

率分别为 16.47 dBm、22.49 dBm 和 26.01 dBm,平坦度分别为 0.11 dB、0.12 dB 和 0.11 dB,载噪比为 61.16 dB、61.13 dB 和 61.20 dB。随着 PD 响应度的提高,MFC 的平坦度和载噪比几乎没有变化,功率变化明显。因此,若想提高输出功率,提高 PD 的响应度即可。

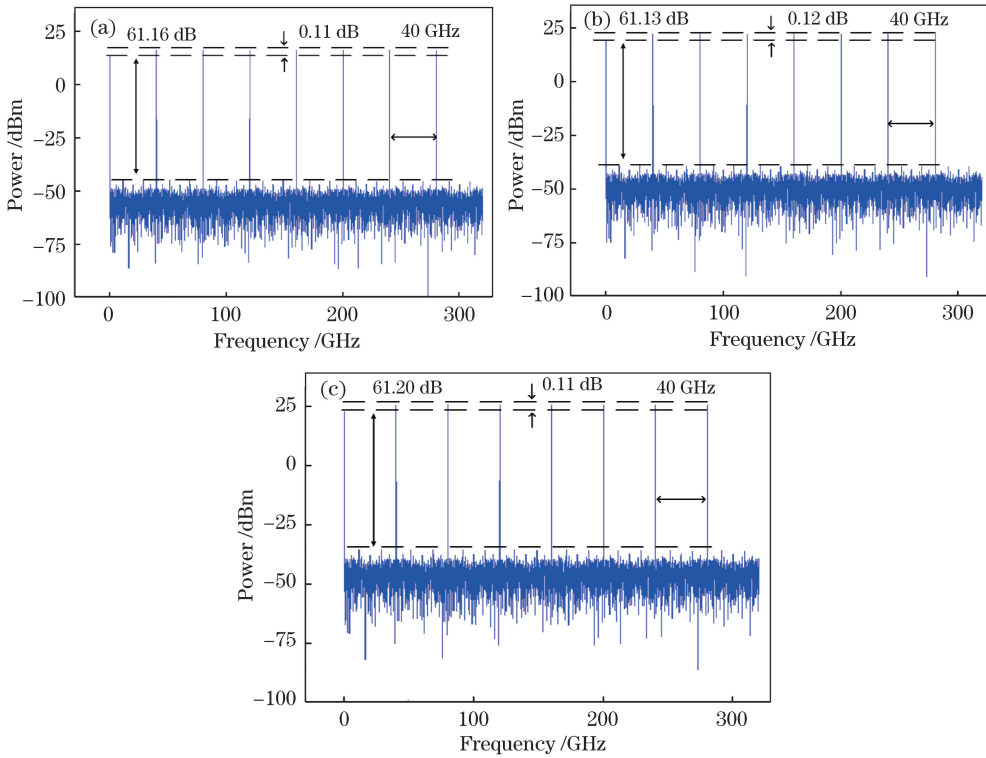


图 8 不同 PD 响应度时级联 MZM 光学回路稳定输出结果。(a) 0.5 A/W; (b) 1 A/W; (c) 1.5 A/W
 Fig. 8 Results of the stable output of the cascaded MZM optical loop under different responsiveness of PD.
 (a) 0.5 A/W; (b) 1 A/W; (c) 1.5 A/W

4 结 论

详细介绍了基于级联 MZM 光学回路产生高性能 MFC 的产生方案。建立了生成 MFC 的理论模型,并利用光通信系统设计软件 Optisystem 进行仿真研究,分析了光源功率、光源线宽以及射频信号的频率和 PD 响应度对产生 MFC 的影响,进一步验证了本方案的可行性。最终生成的 MFC 在 300 GHz 的带宽内平坦度达 0.12 dB,功率达 22.49 dBm,通过改变 RF 信号的频率,可以得到频率间隔分别为 10, 20, 40 GHz 的梳线。与其他方案相比,本方案结构简单、易于调节,生成的 MFC 具有带宽大、功率高、载噪比高和可调谐的优点,研究结果可为利用级联 MZM 光学回路产生 MFC 的应用提供理论指导。

参 考 文 献

- [1] Wu J G, Wu Z M, Tang X, *et al.* Experimental demonstration of LD-based bidirectional fiber-optic chaos communication [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(6): 587-590.
- [2] Lin F Y, Liu J M. Diverse waveform generation using semiconductor lasers for radar and microwave applications [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6): 682-689.
- [3] Chow W W, Wieczorek S. Using chaos for remote sensing of laser radiation[J]. Optics Express, 2009, 17(9): 7491-7504.
- [4] Ma H H, Tang X H, Wu T, *et al.* New method to design a low-phase-noise millimeter-wave PLL frequency synthesizer [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(6): 1194-1197.
- [5] Chen D, Nie C, Yu Y S. Application of IP microwave in 3G/LTE mobile backhaul network[C]

- // 2014 National Conference on Wireless and Mobile Communications. Beijing: Digital Communication World, 2014: 94-97.
- 陈丹, 聂昌, 裴郁杉. IP 微波在 3G/LTE 移动回传网络中的应用研究[C] // 2014 年度全国无线及移动通信学术大会(WMC'14)论文集. 北京: 数字通信世界, 2014: 94-97.
- [6] Li Q L, Jiang W S, Xu Y F, *et al.* Analysis and design of wide-band comb generator based on SRD [C] // 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), May 5-8, 2012, Shenzhen, China. New York: IEEE, 2012: 12849688.
- [7] Giannakidis K, Sgourenas S, Kanteres A, *et al.* A 17.5-22.5 GHz fractional: N wideband frequency synthesizer in 65 nm CMOS technology [C] // 2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), October 3-4, 2016, London, United Kingdom. New York: IEEE, 2016: 209-212.
- [8] Hagemann M J, Stenger F S, Yarotski D A. Linewidth of the harmonics in a microwave frequency comb generated by focusing a mode-locked ultrafast laser on a tunneling junction[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(22): 223107.
- [9] Jiang X, Fang N, Wang L T. Ultra-broadband microwave frequency comb generated from cascaded optically injected semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 121403.
蒋鑫, 方捻, 王陆唐. 级联光注入半导体激光器产生超宽带微波频率梳[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 121403.
- [10] Chan S C, Xia G Q, Liu J M. Optical generation of a precise microwave frequency comb by harmonic frequency locking [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13): 1917-1919.
- [11] Xiao S, Hollberg L, Diddams S A. Low-noise synthesis of microwave and millimetre-wave signals with optical frequency comb generator [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(3): 170-171.
- [12] Sun W H, Liu J G, Wang W T, *et al.* Multi-microwave sources generation based on dual optical frequency combs [C] // 2015 International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE), May 4-6, 2015, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE, 2015: 15240737.
- [13] Wang W T, Liu J G, Sun W H, *et al.* Multi-band local microwave signal generation based on an optical frequency comb generator [J]. *Optics Communications*, 2015, 338: 90-94.
- [14] Wu D X, Xue X X, Li S Y, *et al.* Photonic generation of multi-frequency phase-coded microwave signal based on a dual-output Mach-Zehnder modulator and balanced detection [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14516-14523.
- [15] Shao Q. Research on the generation technology of optical frequency comb based on external modulation and microwave frequency comb [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.
邵茜. 基于外调制器的光梳产生技术与微波频率梳产生技术的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [16] Liu Q. Research of microwave frequency comb generation technology based on optical recirculating acousto-optic frequency shift [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018.
刘谦. 基于光学声光频移回路的微波频率梳产生技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [17] Yuan M Y, Liu B, Wang T L, *et al.* Sawtooth waveform generation based on two parallel Mach-Zehnder modulators [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070701.
袁牧野, 刘波, 王天亮, 等. 基于并联马赫-曾德尔调制器的锯齿波生成方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070701.
- [18] Zhou W. Research and experiments on generation of high frequency microwave signals based on electro-optic external modulation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
周威. 基于光电外调制的高倍频微波信号光子学生成研究与实验[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.