

# 基于单个双驱动马赫-曾德尔调制器的宽且平坦的可调谐光学频率梳

邵茜 高迪 陈静远 李培丽

南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210003

**摘要** 基于单个双驱动马赫-曾德尔调制器(DDMZM),提出一种宽且平坦的可调谐光学频率梳(OFC)的产生方案,其结构简单、易于实现、成本低。对方案原理进行理论分析,利用 Optisystem 7.0 软件进行仿真研究。结果表明,产生的 OFC 梳线数目不多,但平坦度较好,中心频率和梳线间距均可独立调谐。可调谐光源的中心频率决定了 OFC 的中心频率。将基于光外差法产生的微波射频信号作为 DDMZM 的驱动信号,确定了 OFC 的梳线间距,最大可达 150 GHz,有效频谱带宽为 600 GHz。

**关键词** 激光光学; 光学频率梳; 双驱动马赫-曾德尔调制器; 光外差法; 微波射频信号

**中图分类号** TN911.74 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.071402

## Generation of Wide and Flat Tunable Optical Frequency Comb Based on Single Dual Drive Mach-Zehnder Modulator

Shao Qian Gao Di Chen Jingyuan Li Peili

School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China

**Abstract** Based on single dual drive Mach-Zehnder modulator (DDMZM), a scheme of generating wide and flat tunable optical frequency comb (OFC) is proposed. This scheme has the advantages of simple structure easy to implement, and low cost. A theoretical analysis on the principles of the scheme is conducted and simulation research is carried out with the software Optisystem 7.0. The results show that, as for the generated OFC, although the comb-line number is not big, the flatness is better, and both of its center frequency and line spacing can be tuned independently. The center frequency of the tunable light source determines that of OFC. The comb-line spacing of OFC is obtained by the generated microwave radio-frequency signal based on optical heterodyne method as driving signal of DDMZM, which is up to 150 GHz, and the effective band width is 600 GHz.

**Key words** laser optics; optical frequency comb; dual drive Mach-Zehnder modulator; optical heterodyne method; microwave radio-frequency signal

**OCIS codes** 250.4110; 300.6170; 230.4110

## 1 引言

光学频率梳(OFC)是一种能够发射离散的、等间距频率光的光源,光谱形状如同梳子<sup>[1]</sup>。OFC实现了微波频率与光学频率的直接连接,极大地促进了时间、频率、波长等物理量精密测量的发展。除此之外,OFC在超级激光器、超灵敏化学探测器、长途通信等领域也有广泛的应用。

产生 OFC 一直是研究的热点,国内外学者对其进行了大量的探索,提出了多种方案。产生 OFC 可基于

**收稿日期:** 2016-01-25; **收到修改稿日期:** 2016-01-28; **网络出版日期:** 2016-06-12

**基金项目:** 国家自然科学基金(61275067,61302026),国家教育部博士点基金资助项目(20123223120005)、江苏省自然科学基金(BK2012830,BK2012432)

**作者简介:** 邵茜(1991—),女,硕士研究生,主要从事光通信和光信号处理方面的研究。

E-mail: 15077879109@163.com

**导师简介:** 李培丽(1972—),女,博士,教授,主要从事光通信和光信号处理方面的研究。E-mail: lipl@njupt.edu.cn

不同的外调制器,如相位调制器(PM)、强度调制器(IM)、电吸收调制器(EAM)、偏振调制器等。利用 PM 对连续光进行相位调制产生 OFC<sup>[2-6]</sup>的方法比较简单灵活。文献[2]中的方案是利用级联的 PM 产生平坦的 OFC。为保证输出谱线具有较好的平坦度,方案中使用了较多 PM,所以实验成本较高。利用 IM 产生的 OFC<sup>[7-9]</sup>具有可调谐带宽和梳线间距,且梳线数目可观,平坦度也较好。文献[7]中的方案是利用 IM 产生平坦的可调谐 OFC,其中射频(RF)信号的频率决定了 OFC 谱线间距,增加 IM 的个数可以增加 OFC 的数目。文献[10]中的方案是基于 EAM 产生 OFC,EAM 在振幅选通电路中的时间窗较短,使用 EAM 作为限幅门能使输出谱线具有较好的平坦度,但谱线的带宽和梳线间距不可调谐,梳线数目不多。同样,对连续光进行偏振调制也可以产生 OFC<sup>[11-12]</sup>。文献[13]中的方案是基于微环谐振腔产生平坦的 OFC,当抽运光的波长和微环的谐振波长比较接近且功率超过阈值时,抽运光会在微谐振腔中形成回音壁模式,回音壁模式的特殊性质使得入射光的频谱得到有效展宽,形成梳状频谱。另外,基于光学非线性效应也可以产生 OFC<sup>[14]</sup>,但是控制光学非线性效应过程的难度较大,且梳线的中心波长和间距均不可调谐。

基于外调制器产生 OFC 的方案结构简单、易于实现、稳定性高,输出的光谱较为平坦,梳线数目也较为可观。但是它需要借助 RF 信号源作为驱动信号向调制器提供特定频率的电压,而 RF 信号源的价格比较昂贵,增加了实验成本。此外,利用外调制器产生的 OFC,可用频带宽,但梳线间隔比较窄,最大梳线间隔约为 40 GHz。本文基于单个双驱动马赫-曾德尔调制器(DDMZM),提出一种新颖的宽且平坦的可调谐 OFC 产生方案,其结构简单、灵活、易于操控。利用光外差法产生的微波 RF 信号具有高频率、大功率和可调谐的特点,可代替通常使用的 RF 信号源,节约成本。利用该方案产生的 OFC 梳线间隔和频谱带宽都较宽,最大梳线间距可达 150 GHz,有效频谱带宽为 600 GHz。对方案原理进行理论分析,并利用仿真软件 Optisystem 7.0 验证方案的可行性,分析了各系统参量对输出 OFC 的中心频率、梳线间距、谱线平均功率和频谱纯度的影响。

## 2 工作原理

图 1 所示是基于单个 DDMZM 产生宽且平坦的可调谐 OFC 的结构示意图。将中心频率为  $f_2$  的可调谐光源(TLS2)发出的光信号平均分成两部分,一部分与中心频率为  $f_1$  的可调谐光源(TLS1)发出的光信号一起注入到光耦合器(OC)中,经混频后,通过光电二极管(PD)进行检测,产生了频率  $\Delta f = |f_1 - f_2|$  的微波 RF 信号<sup>[15]</sup>;另一部分作为输入光源,注入到 DDMZM 中,产生的微波 RF 信号可作为 DDMZM 的驱动信号。光源经 DDMZM 调制后,输出了中心频率为  $f_2$ 、梳线间距为  $\Delta f$  的 OFC,利用光谱分析仪(OSA)观察其频谱图。

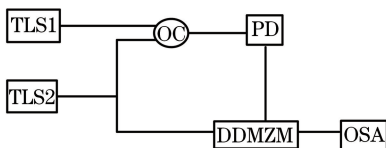


图 1 基于单个 DDMZM 产生宽且平坦的可调谐 OFC 的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of generation of wide and flat tunable OFC based on single DDMZM

## 3 理论模型

设两个可调谐光源 TLS1 与 TLS2 的电场表达式分别为

$$\begin{cases} E_{\text{out1}}(t) = E_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) \\ E_{\text{out2}}(t) = E_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2) \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $E_1$  和  $E_2$  分别为两束光的电场振幅, $f_1$  和  $f_2$  分别是 TLS1 与 TLS2 的中心频率, $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为两束光的初始相位(一般设为 0)。

两束光发生干涉,经 PD 探测后,输出的电流<sup>[16]</sup>

$$I(t) = \Re [E_{\text{out1}}(t) + E_{\text{out2}}(t)] [E_{\text{out1}}(t) + E_{\text{out2}}(t)]^* =$$

$$\Re\{\rho_1 + \rho_2 + \sqrt{\rho_1\rho_2} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t]\} = \Re[\rho_1 + \rho_2 + \sqrt{\rho_1\rho_2} \cos(2\pi\Delta ft)], \quad (2)$$

式中  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为两束光的光功率,  $\Re$  为探测器的响应度, 是 PD 的一个重要参数。在(2)式中,  $\rho_1 + \rho_2$  表示直流光电流,  $\sqrt{\rho_1\rho_2} \cos(2\pi\Delta ft)$  是真正需要产生的微波 RF 信号。由于 PD 带宽有限, 其最终输出的光电流(即微波 RF 信号的电流)大小

$$i_{\text{RF}}(t) = \sqrt{\rho_1\rho_2} \cos(2\pi\Delta ft), \quad (3)$$

式中  $\Delta f$  为产生的微波 RF 信号频率。根据光电探测器的等效电路原理, 输出的微波 RF 信号电压特性为  $u_{\text{RF}} = R \cdot i_{\text{RF}}(t)$ , 其中  $R$  为光电探测器的等效电阻<sup>[17]</sup>。可假定微波 RF 信号对应的光电压

$$u_{\text{RF}}(t) = V_{\text{RF}} \cos(2\pi\Delta ft), \quad (4)$$

式中  $V_{\text{RF}}$  为电压的振幅。根据 DDMZM 的结构特性, 其上下臂的调制电压相同, 此处均为微波 RF 信号的电压  $u_{\text{RF}}(t)$ , 则 DDMZM 上下臂施加的总电压可表示为

$$\begin{cases} v_1(t) = v_{\text{bias1}} + u_{\text{RF}}(t) \\ v_2(t) = v_{\text{bias2}} + u_{\text{RF}}(t) \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$  分别是上下臂施加的总电压,  $v_{\text{bias1}}$ 、 $v_{\text{bias2}}$  分别是上下臂的偏置电压。上下臂引起的附加相位分别为

$$\begin{cases} \Phi_1(t) = \varphi_1 + \Delta\Phi_1(t) = \pi \frac{v_{\text{bias1}}}{V_\pi} + \pi \frac{u_{\text{RF}}(t)}{V_\pi} \\ \Phi_2(t) = \varphi_2 + \Delta\Phi_2(t) = \pi \frac{v_{\text{bias2}}}{V_\pi} + \pi \frac{u_{\text{RF}}(t)}{V_\pi} \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\Phi_1(t)$  和  $\Phi_2(t)$  分别为两臂引起的光信号总相移,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  为两臂引起的固定相移, 包括直流偏置电压及双臂自身引起的固定相移,  $\Delta\Phi_1(t)$  和  $\Delta\Phi_2(t)$  分别为两臂上由微波 RF 信号引起的相移。  $V_\pi$  为半波电压, 即产生  $\pi$  相位差时输出光强从最大变为最小时所需要的开关电压。

$E_{\text{out2}}(t)$  作为输入光源, 经 DDMZM 调制后, 最终输出的电场为

$$\begin{aligned} E(t) &= E_{\text{out2}}(t) \cos\{\Phi_1(t) - \Phi_2(t)\} / 2 \exp\{i[\Phi_1(t) + \Phi_2(t)] / 2\} = \\ &= E_2 \cos(2\pi f_2 t) \cos[\pi(V_{\text{bias1}} - V_{\text{bias2}}) / 2] \exp\{i[V_{\text{bias1}} + V_{\text{bias2}} + 2V_{\text{RF}} \cos(2\pi\Delta ft)] / 2\} = \\ &= \sqrt{\rho_2} \cos[\pi(V_{\text{bias1}} - V_{\text{bias2}}) / V_\pi] \cdot \exp[i(V_{\text{bias1}} + V_{\text{bias2}}) / 2] \cdot \exp(i2\pi f_2 t) \cdot \exp[iV_{\text{RF}} \cos(2\pi\Delta ft)] = \\ &= A \cdot \exp(i2\pi f_2 t) \cdot \exp[iV_{\text{RF}} \cos(2\pi\Delta ft)]. \end{aligned} \quad (7)$$

为了简化(7)式, 设  $E(t)$  的幅度  $A = \sqrt{\rho_2} \cos\left[\frac{\pi}{V_\pi}(V_{\text{bias1}} - V_{\text{bias2}})\right] \cdot \exp\left[\frac{i(V_{\text{bias1}} + V_{\text{bias2}})}{2}\right]$ 。(7)式的最后一个乘积项是以  $\Delta f$  为周期的关于时间的函数, 可将其展开为傅里叶级数, 即

$$\exp[iV_{\text{RF}} \cos(2\pi\Delta ft)] = \sum_{-\infty}^{\infty} J_n(V_{\text{RF}}) \exp(in2\pi\Delta ft), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$

从而, (7) 式的展开式为

$$\begin{aligned} E(t) &= A \sum_{-\infty}^{\infty} J_n(u_{\text{RF}}) \exp[i2\pi(f_2 t + n\Delta ft)] = A \sum_{-\infty}^{\infty} J_0(u_{\text{RF}}) \exp(i2\pi f_2 t) + \\ &= A \sum_{-\infty}^{\infty} J_1(u_{\text{RF}}) \exp[i2\pi(f_2 t + \Delta ft)] + A \sum_{-\infty}^{\infty} J_{-1}(u_{\text{RF}}) \exp[i2\pi(f_2 t - \Delta ft)] + \\ &= A \sum_{-\infty}^{\infty} J_2(u_{\text{RF}}) \exp[i2\pi(f_2 t + 2\Delta ft)] + A \sum_{-\infty}^{\infty} J_{-2}(u_{\text{RF}}) \exp[i2\pi(f_2 t - 2\Delta ft)] + \\ &= A \sum_{-\infty}^{\infty} J_3(u_{\text{RF}}) \exp[i2\pi(f_2 t + 3\Delta ft)] + A \sum_{-\infty}^{\infty} J_{-3}(u_{\text{RF}}) \exp[i2\pi(f_2 t - 3\Delta ft)] + \dots, \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $J_n$  为  $n$  阶的贝塞尔函数。由(9)式可以得出, 调频后输出光信号的相位变化因子为  $n\Delta ft$ 。所以单频光源经 DDMZM 调制后产生了中心频率为  $f_2$ 、梳线间距为  $\Delta f$  的光谱。

## 4 仿真结果与分析

利用 Optisystem 7.0 软件,对基于单个 DDMZM 产生宽且平坦的可调谐 OFC 的方案进行仿真研究,分析了各光源参数对 OFC 的梳线间距、中心频率、谱线平均功率和频谱纯度的影响。在仿真中,进行如下参数设置:TLS1 和 TLS2 的光功率均为 1 mW,初始相位均为 0,线宽分别为 10 MHz 和 5 MHz;DDMZM 调制电压为 3.349 V,两个偏置电压分别为  $-3.99$  V 和  $-1.995$  V。如没有特殊说明,器件参数均采用上述值。

### 4.1 输出的 OFC 的梳线间距可调谐

其他参数保持不变,设置 TLS2 的中心频率  $f_2 = 193.1$  THz,当 TLS1 的中心频率分别为 193.13, 193.15, 193.2, 192.95 THz 时,两个光信号经拍频后,得到相应的微波 RF 信号频率依次为 30, 50, 100, 150 GHz。TLS2 作为输入光源,经 DDMZM 调制后,输出的 OFC 光谱图如图 2 所示。从图 2(a)~(d)中可以看出,产生的 OFC 梳线间距分别为 30, 50, 100, 150 GHz,与微波 RF 信号的频率变化一致。产生的有效梳线数目均为 5,有效频谱带宽依次为 120, 200, 400, 600 GHz。经计算,相应的平坦度依次为 0.9888 dB, 1 dB, 1.05 dB 和 1.106 dB。通常把平坦度小于 3 dB 的 OFC 视为较平坦,所以此方案产生的 OFC 较为平坦。由图 2(d)可知,OFC 的梳线间距为 150 GHz,有效频谱带宽为 600 GHz,这是其他基于外调制器产生 OFC 的方案较难达到的,所以本方案在产生较宽的梳线间距和频谱带宽上具有很大优势。当微波信号的频率高于 150 GHz 时,输出的 OFC 平坦度发生了严重的劣化,因此 150 GHz 的梳线间距是极限值。综合上述,产生的 OFC 梳线数目不多,但平坦度较好。在  $f_2$  为定值的情况下,利用光外差法产生的高频可调谐微波信号的频率  $\Delta f$  决定了产生的 OFC 的梳线间距,并使输出的 OFC 的梳线间距和频谱带宽在很大范围内连续可调谐。

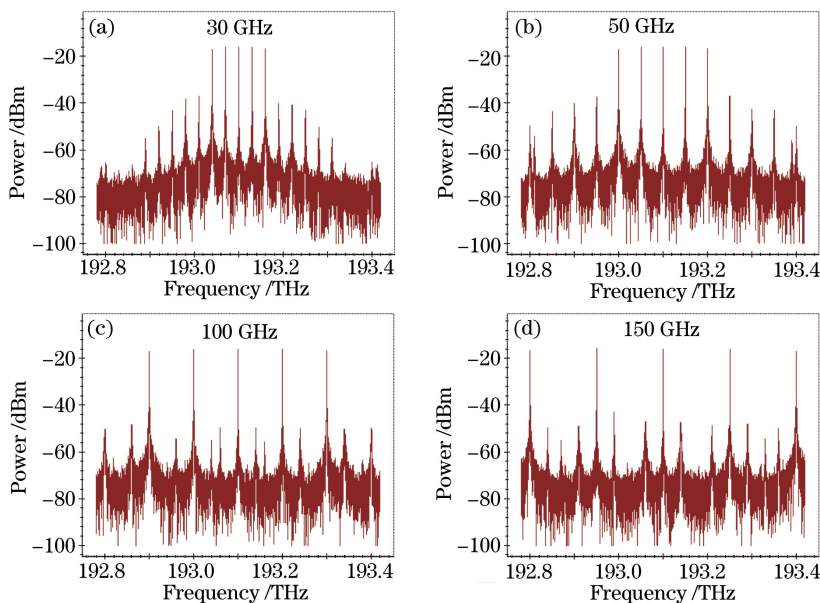


图 2 不同梳线间距的 OFCs 光谱图。(a) 30 GHz; (b) 50 GHz; (c) 100 GHz; (d) 150 GHz

Fig. 2 Spectra of OFCs with different comb-line spacing. (a) 30 GHz; (b) 50 GHz; (c) 100 GHz; (d) 150 GHz

### 4.2 输出的 OFC 的中心频率可调谐

保持微波信号的频率不变( $\Delta f = 50$  GHz),即保持两输入光源的中心频率差值不变,设置 TLS2 的中心频率分别为 192.1, 193.1, 194.1, 198.1 THz 时,输出 OFC 的光谱图如图 3(a)~(d)所示。可以看出,输出的 OFC 的梳线间距均为 50 GHz,中心频率与 TLS2 的中心频率变化一致,依次为 192.1, 193.1, 194.1, 198.1 THz。经计算,得到的 OFC 的平坦度均为 1 dB。因此,TLS2 的中心频率决定了输出 OFC 的中心频率,且输出 OFC 的中心频率在 192.1~198.1 THz 范围内连续可调谐。



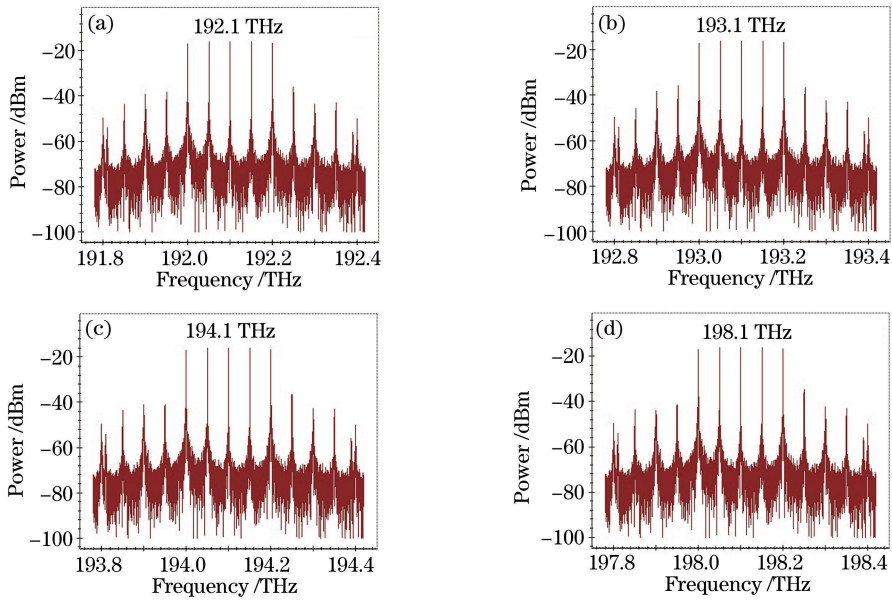


图 3 不同中心频率下的 OFCs 光谱图。(a) 192.1 THz; (b) 193.1 THz; (c) 194.1 THz; (d) 198.1 THz

Fig. 3 Spectra of OFCs for different center frequency. (a) 192.1 THz; (b) 193.1 THz; (c) 194.1 THz; (d) 198.1 THz

#### 4.3 光源功率对产生 OFC 的影响

设置 TLS1 和 TLS2 的中心频率分别为 193.15 THz 和 193.1 THz, 两光源的输入功率同时为 0.3, 1, 10, 100 mW 时, 输出的 OFC 的光谱图如图 4(a)~(d) 所示。可以看出, 随着两光源输入功率的增大, 输出的 OFC 谱线的平均功率也随之增大。因此, 可以适当提高输入光源的功率来获得信号功率较高的 OFC。

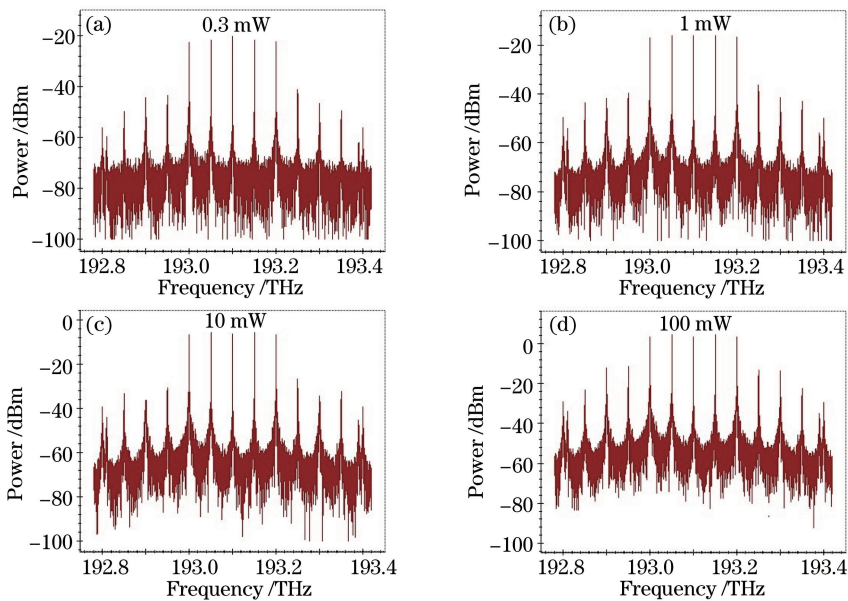


图 4 不同输入功率下 OFCs 光谱图。(a) 0.3 mW; (b) 1 mW; (c) 10 mW; (d) 100 mW

Fig. 4 Spectra of OFCs for different input power. (a) 0.3 mW; (b) 1 mW; (c) 10 mW; (d) 100 mW

#### 4.4 光源谱线宽度对产生 OFC 的影响

设置 TLS1 和 TLS2 的中心频率分别为 193.15 THz 和 193.1 THz, 当两光源的谱线宽度同时为 0.01, 0.1, 1, 10 MHz 时, 输出的 OFC 的光谱图如图 5 所示。从图 5(a)~(d) 中可以看出, 光源的谱线宽度越大, 产生的 OFC 所叠加的频率成分越多, 频率纯度越低, 经计算相应的平坦度依次为 0.355 dB, 0.24 dB, 0.65 dB 和 2.204 dB。所以为了获得较好频率纯度和平坦度的 OFC, 应选择谱线宽度较小的可调谐激光器。

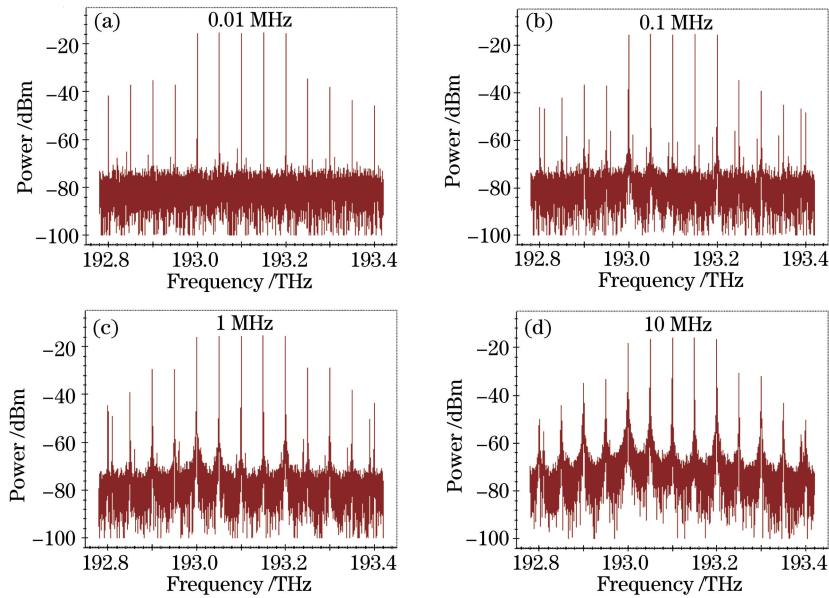


图 5 不同线宽下的 OFCs 光谱图。(a) 0.01 MHz; (b) 0.1 MHz; (c) 1 MHz; (d) 10 MHz

Fig. 5 Spectra of OFCs for different input linewidth. (a) 0.01 MHz; (b) 0.1 MHz; (c) 1 MHz; (d) 10 MHz

## 5 结 论

基于单个 DDMZM,提出了一种产生宽且平坦的可调谐 OFC 的方案,该方案新颖独特、结构简单、易于操控。利用光外差法产生的微波 RF 信号为 DDMZM 提供了高频率、可调谐的驱动信号。对方案原理进行理论分析,并利用 Optisystem 7.0 软件对方案进行仿真研究,分析了各光源参数对产生的 OFC 的梳线间距、中心频率、谱线平均功率和频谱纯度的影响。产生的 OFC 的梳线数目虽然不多,但平坦度较好,其中心频率和梳线间距均独立可调谐。其中微波 RF 信号的频率决定了 OFC 的梳线间距, TLS2 的中心频率决定了 OFC 的中心频率。与其他基于外调制器产生 OFC 的方案相比,输出的 OFC 的梳线间距和有效频谱带宽均在大范围内连续可调谐。其中,梳线间距可达到 150 GHz,有效频谱带宽高达 600 GHz。适当提高两光源的输入功率可以提高 OFC 谱线的平均功率。选择谱线宽度小的激光器可以提高 OFC 的频率纯度和平坦度。

## 参 考 文 献

- Wei Zhiyi. The 2005 Nobel prize in physics and optical frequency comb techniques[J]. Physics, 2006, 35 (3): 213-217. 魏志义. 2005 年诺贝尔物理学奖与光学频率梳[J]. 物理, 2006, 35(3): 213-217.
- Zhang J, Yu J, Chi N, *et al.*. Flattened comb generation using only phase modulators driven by fundamental frequency sinusoidal sources with small frequency offset[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 552-554.
- Ho Y Y K, Qian L. Dynamic arbitrary waveform shaping in a continuous fiber[J]. Optics Letters, 2008, 33(11): 1279-1281.
- Jiang Z, Huang C B, Leaird D E, *et al.*. Optical arbitrary waveform processing of more than 100 spectral comb lines[J]. Nature Photonics, 2007, 1(8): 463-467.
- Geisler D J, Fontaine N K, He T, *et al.*. Modulation-format agile, reconfigurable Tb/s transmitter based on optical arbitrary waveform generation[J]. Optics Express, 2009, 17(18): 15911-15925.
- Scott R P, Fontaine N K, Heritage J P, *et al.*. Dynamic optical arbitrary waveform generation and measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(18): 18655-18670.
- Shang L, Wen A, Lin G, *et al.*. A flat and broadband optical frequency comb with tunable bandwidth and frequency spacing[J]. Optics Communications, 2014, 331: 262-266.
- Preussler S, Wenzel N, Schneider T. Flat, rectangular frequency comb generation with tunable bandwidth and frequency spacing[J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1637-1640.

- 9 Zhou X, Zheng X, Wen H, *et al.*. Generation of broadband optical frequency comb with rectangular envelope using cascaded intensity and dual-parallel modulators[J]. Optics Communications, 2014, 313: 356-359.
- 10 Zhang F, Wu J, Li Y, *et al.*. Flat optical frequency comb generation and its application for optical waveform generation [J]. Optics Communications, 2013, 290: 37-42.
- 11 Chen C, Zhang F, Pan S. Generation of seven-line optical frequency comb based on a single polarization modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(22): 2164-2166.
- 12 Li W, Wang W T, Sun W H, *et al.*. Generation of flat optical frequency comb using a single polarization modulator and a Brillouin-assisted power equalizer[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2): 1-8.
- 13 Wang Yuanwu, Zhang Minming, Xia Li, *et al.*. Progress in dispersion control of micro-ring resonator-based optical frequency comb generation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 060001.  
王元武, 张敏明, 夏 历, 等. 基于微环谐振腔产生光频梳的色散控制的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 060001.
- 14 Han Hainian, Zhang Wei, Wang Peng, *et al.*. Precise control of femtosecond Ti: sapphire laser frequency comb[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(5): 2760-2764.  
韩海年, 张 炜, 王 鹏, 等. 飞秒钛宝石光学频率梳的精密锁定[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2760-2764.
- 15 Wang Qinquan, Chen Fushen. Research on characteristics of microwave signals generated by optical heterodyne [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(6): 955-957.  
王沁泉, 陈福深. 光学外差法产生微波信号特性的研究[J]. 半导体光电, 2009, 30(6): 955-957.
- 16 Cheng Wen. Study on photonic generation of microwave signals[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.  
程 雯. 基于光学方法的微波信号产生技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- 17 Zhu Ninghua. Microwave packaging and testing of optoelectronic devices[M]. Beijing: Science Press, 2007.  
祝宁华. 光电子器件微波封装和测试[M]. 北京: 科学出版社, 2007.