

一种基于双光源和偏振技术的平坦光频梳产生方案

孙秀婷¹,范亚斌²,罗静²,杨蓓^{3*},卢智嘉²

(1.石家庄铁道大学 四方学院,石家庄 051132;2. 石家庄学院,石家庄 050035;3.石家庄学院 机电学院,石家庄 050035)

摘要:为了提高光频梳(OFC)平坦度及梳线数量,提出了一种基于双光源和偏振技术的平坦 OFC 产生方案。该方案首先通过调整光相位调制器(O-PM)调制指数实现除主载波外 8 根平坦梳线,再利用偏振技术改变主载波处的峰值功率,产生平坦 OFC。仿真结果表明:当 O-PM 调制指数设定为 2.62 时,即射频信号 $E_1(t)$ 的幅度 E_1 达到 1.67 V 时,能够生成除中心载波外的 8 根梳线平坦梳线;在偏振控制器偏振角度 φ 为 29.8°、线偏振器偏振角度 α 为 45°的条件下,该方案能够生成梳线数量为 10、平坦度达到 0.01 dB、边模抑制比为 6.15 dB 的高平坦 OFC;与单一光源相比,双光源线宽的变化对平坦度的影响更小。

关键词:光频梳;偏振技术;双光源;平坦度

中图分类号:TN929.11 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2024)04-0093-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Flat optical frequency comb generation scheme based on dual light sources and polarization technology

SUN Xiuting¹, FAN Yabin², LUO Jing², YANG Bei^{3*}, LU Zhijia²

(1.Sifang College, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 051132, China; 2. Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China; 3. Mechanical and Electrical College, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: To improve the flatness of optical frequency combs (OFC) and the number of comb lines, a scheme for generating flat OFC based on dual light sources and polarization technology is proposed. This scheme first achieves eight flat comb lines other than the main carrier by adjusting the modulation index of the optical phase modulator(O-PM). Then, it utilizes polarization technology to alter the peak power at the main carrier, resulting in a flat OFC. The simulation results indicate that when the O-PM modulation index is set to 2.62, which corresponds to an amplitude E_1 of 1.67 V for the radio frequency signal $E_1(t)$, eight flat comb lines excluding the central carrier can be generated. Under the conditions of a polarization controller angle φ of 29.8° and a linear polarizer angle α of 45°, this scheme can produce a highly flat OFC with 10 comb lines, a flatness of 0.01 dB, and a side-mode suppression ratio of 6.15 dB. Compared to a single light source, the influence of linewidth changes in dual light sources on flatness is smaller.

Key words: optical frequency comb, polarization technology, dual light sources, flatness

收稿日期:2024-02-04。

基金项目:河北省省级科技计划项目(223203010D)资助;石家庄市科学技术研究与发展计划项目(211080571)资助。

作者简介:孙秀婷(1978—),女,硕士,副教授,石家庄铁道大学四方学院电气工程教师,主要研究方向为光通信、电子电路、信号处理与自动控制,主持或参加多项科研项目 and 教学改革研究项目,被评为省级创新创业教学名师。

*通信作者:杨蓓(1989—),女,硕士,讲师,主要研究方向为光纤通信技术和智能制造处理。



0 引言

光频梳(OFC)在密集波分复用(DWDM)、光正交频分复用(O-OFDM)、超短光脉冲产生和任意波形生成等领域具有重要应用价值,成为近年来的研究热点^[1]。相关文献提出了多种 OFC 产生方案,包括使用锁模激光器产生 OFC,在非线性介质中利用非线性效应产生 OFC,以及使用光调制器产生 OFC^[2-7]。基于光调制器产生光频梳(OFC)的方法因其结构简单、稳定性高以及易于频率调整等特点,被认为是极具潜力的 OFC 产生

孙秀婷,范亚斌,罗静,等:一种基于双光源和偏振技术的平坦光频梳产生方案

方案。光调制器包括光相位调制器(O-PM)、光强度调制器(O-IM)、电吸收调制器(EAM)及光偏振调制器(O-PolM)等,其中采用 O-PM 产生 OFC 具有系统结构简单、控制量少、功率转换效率高等优点,受到了研究学者的广泛关注^[8-13]。文献[14]通过级联 EAM 和 O-PM,在平坦度低于 3 dB 时可以获得 10 根梳线、频率间距为 12.5 GHz 的 OFC。文献[15]将马赫-曾德尔调制器(MZM)偏置以产生载波抑制双边带信号,再与 O-PM 级联,通过调整相位调制指数或微波功率以产生梳线间距和梳线数量可调的 OFC;文献[16]采用了一种结合 O-PM、反馈单元、单模光纤(SMF)、具有不同零色散波长(ZDW)的高非线性光纤(HNLF)和偏振分束器(PBS)的技术,通过非线性效应成功生成了梳线间距为 20 GHz 的 OFC。但是,上述方案由于加入了其它类型的光调制器,导致系统控制参量增多,进而增加了系统实现的难度和不稳定性,大大限制了方案的适用范围。文献[17]虽然只采用 O-PM 产生了一种 0.36 THz 的光子辅助太赫兹波信号,但产生的 OFC 平坦度极差。为进一步提高 OFC 平坦度,本文提出一种基于双光源和偏振技术的平坦 OFC 产生方案。

1 基于双光源和偏振技术的平坦 OFC 产生原理

本文设计的基于双光源和偏振技术的 OFC 产生方案原理图如图 1 所示。该方案只采用 1 个 O-PM,与其它光调制器相比减少了控制变量,降低了系统复杂度,同时有效提升了光功率转换效率。2 个光源输出光信号的频率差及 O-PM 调制指数决定了 OFC 梳线间距及其平坦度。实现方案主要包括以下光电器件:2 个连续波激光器(CW₁、CW₂)、1 个功率合成器、3 个偏振控制器、1 个偏振分束器、1 个偏振合束器、1 个射频正弦波发生器、1 个 O-PM 和 1 个线偏振器。

假定双光源 CW₁、CW₂ 输出的光信号分别为

$$E_1(t) = E_1 \exp \left\{ j\omega_{c_1} t + j \int [\omega_{c_1} + \varepsilon_1 I_1'(t)] dt \right\} \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_2 \exp \left\{ j\omega_{c_2} t + j \int [\omega_{c_2} + \varepsilon_2 I_2'(t)] dt \right\} \quad (2)$$

其中, t 为时间, E_1 、 E_2 和 ω_{c_1} 、 ω_{c_2} 分别为 CW₁、CW₂ 输出光信号幅度和角频率($\omega_{c_i} = 2\pi f_i$), 而 f_i 为第 i 个($i=1,2$)激光器输出光信号的中心频率,同时假定 $f_2 > f_1$ 。 $I_1'(t)$ 和 $I_2'(t)$ 分别为 CW₁、CW₂ 注入电流变化率, ε_1 和 ε_2 分别为 CW₁、CW₂ 各自线宽因子。

图 1 中, A 点输出的光信号 $E(t) = E_1(t) + E_2(t)$ 。光信号 $E(t)$ 经过偏振角为 φ 的偏振控制器后进入偏振分束器, 并被分成 x 和 y 偏振方向信号, 其表达式为

$$E_x(t) = E(t) \cos \varphi \quad (3)$$

$$E_y(t) = E(t) \sin \varphi \quad (4)$$

y 偏振方向的光信号直接接入偏振合束器, 而 x 偏振方向光信号则通过 O-PM 进行相位调制, 调制后图 1 中 B 点光信号表达式为

$$E_B(t) = E_x(t) \exp[j\Delta\phi A_r \cos(\omega_r t)] \quad (5)$$

其中, $\Delta\phi$ 为 O-PM 相位偏移量。 $A_r \cos(\omega_r t)$ 为驱动 O-PM 的射频信号, A_r 和 ω_r 分别为射频信号幅度和角频率, 且 $\omega_r = 2\pi f_r$, f_r 为射频驱动信号频率, $f_r = 2(f_2 - f_1)$ 。

随后, 2 路光信号经过偏振合束器合束后, 再通过偏振角为 α 的线偏振器, 最终变成单偏振光信号。其表达式为

$$E_{\text{pol}}(t) = E_B(t) \cos \alpha + E_y(t) \sin \alpha \quad (6)$$

令 $E_2(t) = 0$, 此时式(5) (B 点处光信号表达式) 变为

$$E_B(t) = E_1 \exp(j\omega_{c_1} t) \exp[j\pi A_r \cos(\omega_r t)/2] \cos \varphi \quad (7)$$

对式(7)进行贝塞尔展开, 可得

$$E_B(t) = E_1 \cos \varphi \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m) \exp(j\omega_{c_1} t + jn\omega_r t) \quad (8)$$

其中, m 为 O-PM 调制指数, $m = \pi A_r/2$; $J_n(m)$ 为 n 阶第一类贝塞尔函数。

J_0 、 J_1 和 J_2 这 3 条第一类贝塞尔函数曲线如图 2 所示, 由于更高阶的贝塞尔函数曲线的幅值过低, 本文

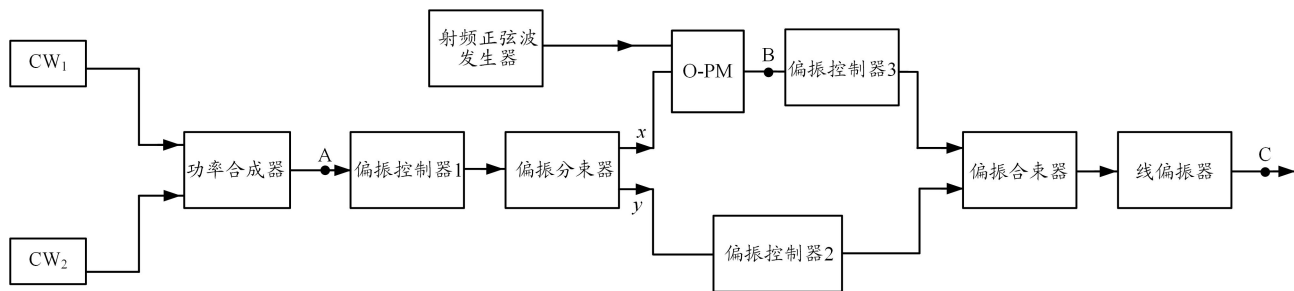


图 1 基于双光源和偏振技术的 OFC 产生方案原理图

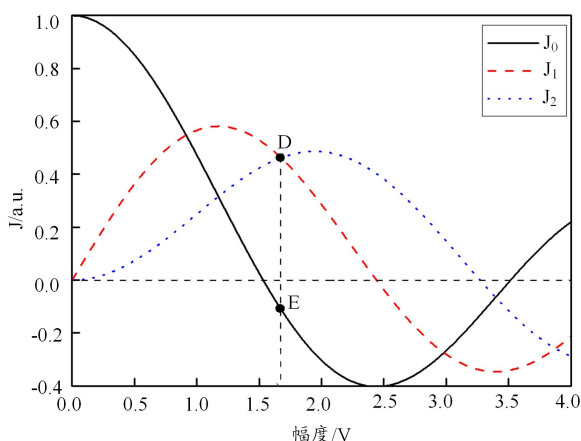


图2 第一类贝塞尔函数曲线图

忽略不计。从图2可以看出,当射频信号 $E_1(t)$ 的幅度 $E_1=1.67$ V 时,D点处的 $|J_1|=|J_2|=0.46$ a.u.,而E点处的 $|J_0|=0.11$ a.u.。这时 ± 1 阶边带和 ± 2 阶边带功率相同,而主载波功率远低于 ± 1 和 ± 2 阶边带功率。这相当于产生了含有5根梳线的OFC,但平坦度较差,若能将主载波功率修正到 ± 1 和 ± 2 阶边带功率大小,则可以产生平坦的OFC。

为了进一步提升OFC平坦度,本文将偏振技术引入到系统中,通过调整偏振控制器和线偏振器的偏振角度,可以优化主载波功率。将式(1)、式(4)和式(8)代入式(6),可得

$$E_{\text{pol}}(t)=E_1 \exp(j\omega_{c_1} t) \sin \varphi \sin \alpha + E_1 \cos \varphi \cos \alpha \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m) \exp(j\omega_{c_1} t + n\omega_r t) \quad (9)$$

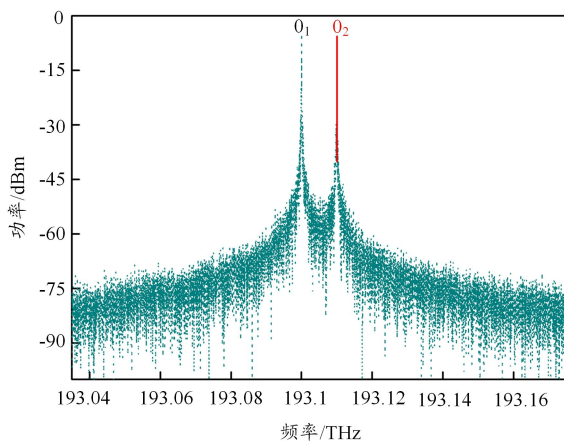
式(9)中的第二个和项是对式(8)中的主载波进行了相应的调整。这种调整是通过改变偏振控制器的偏振角度 φ 以及线偏振器的偏振角度 α 来实现的,从而使式(9)中的主载波与 ± 1 和 ± 2 阶边带功率相当,实现具有5根梳线的平坦OFC。本文利用叠加定理,在 CW_1 的基础上引入频率为 $f_2=f_1/2+f_1$ 的 CW_2 ,以产生具有10根梳线的高平坦度OFC。由于 CW_1 和 CW_2 需要满足特定的波长关系,因此,本文选用了高质量的激光器来确保输出波长的稳定性。为了进一步确保2个光源的波长满足要求,还可以在适当控制成本的基础上增设波长稳定器。

2 仿真实验及分析

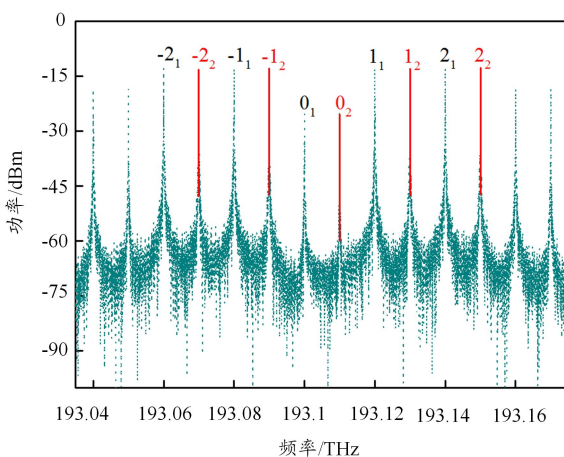
为验证所提方案可行性,本文采用 Optisystem 软件进行仿真验证。仿真参数设置如下: f_1 为 193.1 THz, f_2 为 193.11 THz; CW_1 和 CW_2 的发射功率、线宽和初始相位相同,分别为 0 dBm、10 MHz 和 0° ; 射频驱动信号

频率为 20 GHz (2 倍于 CW_1 和 CW_2 输出光信号中心频率之差),幅度为 1.67 V,以保证 O-PM 调制指数为 2.62;系统速率设定为 5 Gb/s,共传输 $2^{10}-1$ 个 bit,每 bit 抽样 64 点。为减少分析变量数,仿真时设定线偏振器的偏振角度 α 为 45° 。

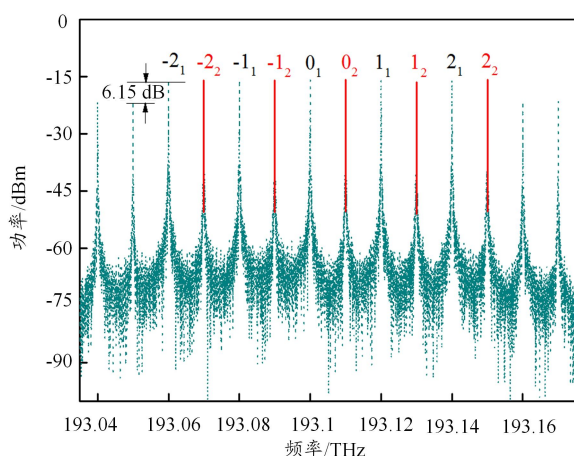
图1中A、B和C点处对应的光频谱如图3所示。从图3(a)可以看出,在 193.1 THz 和 193.11 THz 处各存在1根谱线,其中虚线为 CW_1 输出的中心频率为 193.1 THz 的谱线(用 0_1 表示),而实线则为 CW_2 输出的中心频率为 193.11 THz 的谱线(用 0_2 表示),2根谱线峰值功率均为 -5 dBm。图3(b)中,虚线为 193.1 THz 的激光经 O-PM 后变为已调光信号, 0_1 为 193.1 THz 处的主载波,峰值功率为 -15.39 dBm。 $\pm 1_1$ 分别代表 ± 1 阶边带, $\pm 2_1$ 分别代表 ± 2 阶边带。 ± 1 阶和 ± 2 阶边带峰值功率基本相等,为 -13 dBm,各阶相邻边带间距为 20 GHz(射频驱动信号频率)。同理, 0_2 为 193.11 THz 处的主载波(CW_2 光源发射的激光信号频率),与 $\pm 1_2$ 和 $\pm 2_2$ 构成了一套频谱, $\pm 1_2$ 分别代表 ± 1 阶边带, $\pm 2_2$ 分别代表 ± 2 阶边带,相邻各阶边带间距也是 20 GHz。在



(a) A点处的光频谱



(b) B点处的光频谱



(c) C点处的光频谱

图3 OFC产生系统中不同位置处的光频谱

193.1 THz 和 193.11 THz 处(0_1 和 0_2)峰值功率小于 ± 1 和 ± 2 阶边带功率,故大大降低了这 10 根谱线的平坦度,该结果也与图 2 结论相符。图 3(c)是本文采用偏振技术优化后所得到的高平坦性 OFC 频谱图。可以看出,在 193.1 THz 和 193.11 THz 处(0_1 和 0_2)峰值功率已与 ± 1 和 ± 2 阶边带功率相当,此时对应的平坦度为 0.01 dB,而对应的边模抑制比为 6.15 dB。

2.1 偏振角度对 OFC 平坦度的影响

偏振控制器的偏振角度 φ 变化时对 OFC 平坦度的影响如图 4 所示。可以看出,当 $\varphi=29.8^\circ$ 时对应的平坦度最优,为 0.01 dB。当 φ 从 29.8° 减小到 19.9° 时,平坦度从 0.01 dB 线性劣化到 5.39 dB,而当 φ 从 29.8° 增大到 39.8° 时,平坦度从 0.01 dB 线性劣化到 3.88 dB。故后续分析时设定 $\varphi=29.8^\circ$ 。

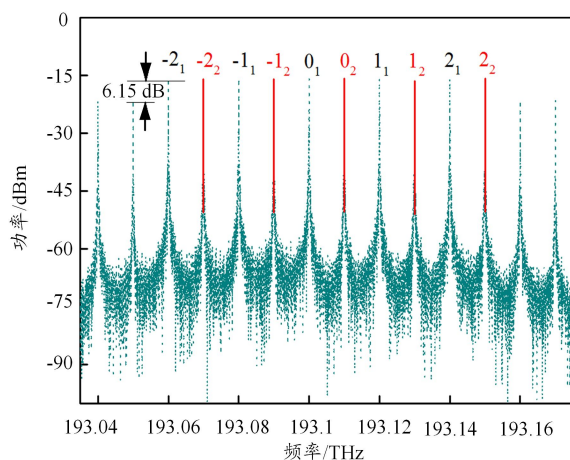


图4 偏振角度对 OFC 的影响

2.2 双光源线宽对 OFC 平坦度的影响

3 种情况下双光源线宽对 OFC 平坦度的影响如图 5 所示。可以看出,当 CW_1 线宽保持 10 MHz 不变,

CW_2 线宽变化(从 0 增大到 30 MHz),或 CW_1 线宽变化(从 0 增大到 30 MHz), CW_2 线宽保持 10 MHz 不变时,这 2 种情况下平坦度的变化范围均达到了 3.4 dB。当 CW_1 和 CW_2 线宽同步变化(从 0 增大到 30 MHz)时,这种情况下的平坦度最大变化范围是 0.68 dB。由此可见,单一光源线宽的变化对平坦度的影响更为显著。

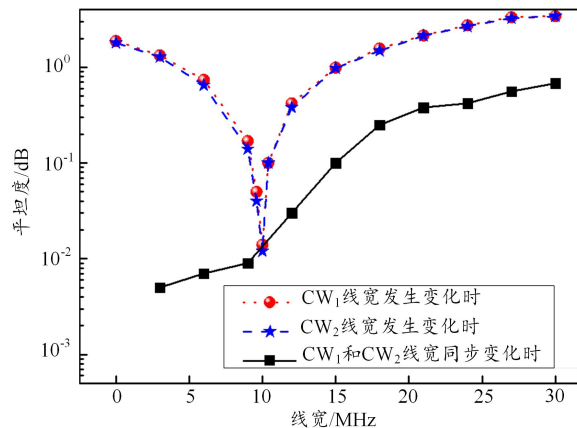


图5 激光器线宽对 OFC 的影响

2.3 双光源初始相位变化对 OFC 的影响

激光器初始相位变化对 OFC 平坦度的影响如图 6 所示。可以看出,无论哪种情况,当光源初始相位从 0° 增大到 180° 时,平坦度几乎没有变化,最大波动仅为 0.001 dB,这表明即使双光源不是同步光源,也不会对平坦度造成过大影响,因此可以减少对双光源同步的需求,从而有效降低系统实现难度。

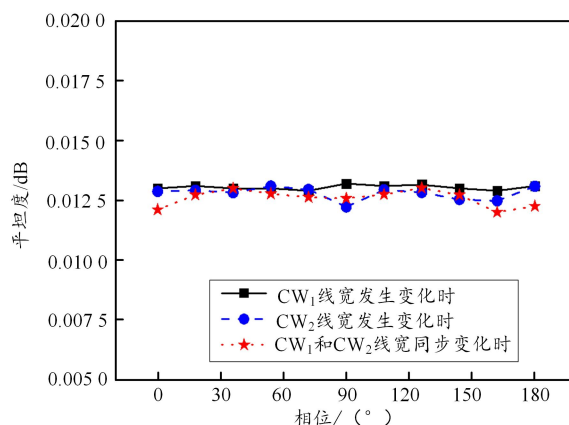


图6 双光源初始相位变化对 OFC 的影响

2.4 梳线间距变化对 OFC 的影响

由前述可知,梳线间距为 $f_2 - f_1 = f_c/2$,即梳线间距为射频驱动信号频率的二分之一。因此,通过调整射频驱动信号频率和双光源中心频率,使其满足 $f_2 - f_1 = f_c/2$,即可调整 OFC 梳线间距。不同梳线间距以 OFC 的影响如图 7 所示。可以看出,当梳线间距分别为 5、10、15、20、40 GHz 时,OFC 平坦度无变化,这表明该方

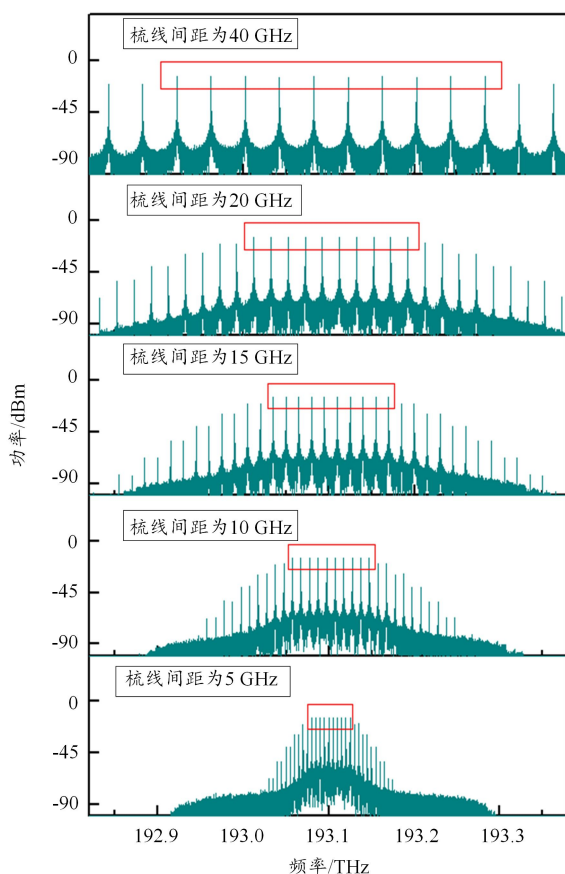


图7 频率间距变化对 OFC 的影响

案 OFC 梳线间距调整灵活且稳定性高。但 10 条有效梳线(图 7 中方框区域内的梳线)之外的梳线数量较多,导致 OFC 功率效率(有效梳线功率与所有梳线功率之比)降低,这是本方案后续需要进一步优化之处。

3 结束语

本文设计了一种基于双光源和偏振技术的平坦 OFC 产生方案, 方案采用双光源以提升梳线数量,引入偏振技术优化 OFC 平坦度。最终,通过试验验证了双光源线宽、初始相位以及射频驱动信号频率对 OFC 平坦度的影响。仿真结果表明,当双光源线宽同步变化时,双光源的初始相位和梳线间距对 OFC 平坦度的影响较小,因此对双光源的要求也相应降低,从而提高了系统的可调谐性。

参考文献:

[1] 蒋玉政, 李晶, 朱伟, 等. 基于锯齿波调制非平坦 OFC 的信道化多频测量[J]. 光学学报, 2023, 43(22): 97–107.

- [2] CHANG L, LIU S, BOWERS J E. Integrated optical frequency comb technologies[J]. Nature Photonics, 2022, 16(2): 95–108.
- [3] ANDRIOLLI N, CASSESE T, CHIESA M, et al. Photonic integrated fully tunable comb generator cascading optical modulators[J]. Journal of Light-wave Technology, 2018, 36(23): 5685–5689.
- [4] SHARMA V, SINGH S, ANASHKINA E A, et al. Demonstration of optical frequency comb generation using four-wave mixing in highly nonlinear fiber[J]. Optik, 2021, 241: 166948-1–166948-11.
- [5] CAO Y, FALLAHPOUR A, ZOU K, et al. Tunable optical single-sideband generation for OOK and PAM4 data channels using an optical frequency comb and nonlinear wave-mixing[J]. Optics Letters, 2020, 45(22): 6294–6297.
- [6] 刘涵, 李子平, 马旭红, 等. 太赫兹量子级联激光器 OFC 射频传输[J]. 光子学报, 2023, 52(1): 53–62.
- [7] GUAN X, MU H, WANG M. Optical frequency comb with tunable free spectral range based on two Mach-Zehnder modulators cascaded with linearly chirped fiber Bragg grating and phase modulator [J]. Optoelectronics Letters, 2022, 18(7): 385–389.
- [8] SAKAMOTO T, CHIBA A. Multiple-frequency-spaced flat optical comb generation using a multiple-parallel phase modulator[J]. Optics Letters, 2017, 42(21): 4462–4465.
- [9] 欧阳斌, 李博, 余志强, 等. 相位调制产生光频率梳的通信实验[J]. 光通信技术, 2020, 44(9): 34–36.
- [10] LV X, LIU J, WU S. Flat optical frequency comb generation based on polarization modulator with RF frequency multiplication circuit and dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. Optik, 2019, 183: 706–712.
- [11] LI R, WU S, YE S, et al. Very flat optical frequency comb generation based on polarization modulator and recirculation frequency shifter [J]. Journal of Optical Communications, 2017, 39(1): 7–12.
- [12] LIN T, ZHAO S, ZHU Z, et al. Generation of flat optical frequency comb based on a DP-QPSK modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 29(1): 146–149.
- [13] THANGARAJ J. Generation of ultra-wide and flat optical frequency comb based on electro absorption modulator[J]. Optoelectronics Letters, 2018, 14(3): 185–188.
- [14] LI Y, ZHOU W, CHEN Y W, et al. Optical comb generator with flat-topped spectral response using one electroabsorption-modulated laser and one phase modulator [J]. Optical Engineering, 2020, 59(1): 016112-1–016112-9.
- [15] ZOU X, PAN W, YAO J. Tunable optical comb generation based on carrier-suppressed intensity modulation and phase modulation[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(5): 468–470.
- [16] DONG Q, SUN B, CHEN F, et al. Flat frequency comb generation based on efficiently multiple four-wave mixing without polarization control [J]. Photonic Sensors, 2016, 6(1): 85–89.
- [17] LI K, CHEN Y, HUANG Y, et al. 0.36 THz photonic Terahertz-wave generation by simple optical frequency comb[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 64: 102581-1–102581-5.