

DOI:10.16136/j.joel.2022.12.0195

# 基于级联相位调制器和光衰减器的光频梳产生研究

卢智嘉, 王现彬\*, 杨 蓓

(石家庄学院 机电学院, 河北 石家庄 050035)

**摘要:**提出了一种基于级联相位调制器和光衰减器的光频梳产生方案,建立了方案的理论模型并进行了系统验证,研究了射频(radio frequency, RF)信号幅度和光衰减器衰减系数对光频梳平坦度的影响。结果表明数值计算与实验结果一致性较好,通过调整 RF 驱动信号幅度和光衰减器衰减系数可产生梳线数量为 15 条、平坦度为 0.8 dB,边模抑制比(side-mode suppression ratio, SMSR)为 5.05 dB 的光频梳。方案中引入滤波器后,在梳线数量保持不变的前提下,其平坦度和 SMSR 可分别提高 62.5% 和 61.4%。

**关键词:**光频梳; 相位调制器; 光衰减器; 平坦度

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)12-1240-08

## Research on optical frequency comb generation based on cascaded phase modulator and optical attenuator

LU Zhijia, WANG Xianbin\*, YANG Bei

(Mechanical and Electrical College, Shijiazhuang University, Shijiazhuang, Hebei 050035, China)

**Abstract:** An optical frequency comb generation scheme based on cascaded phase modulator and optical attenuator is proposed. The theoretical model of the scheme is established and verified systematically. Finally, the effects of radio frequency (RF) signal amplitude and optical attenuator attenuation coefficient on the flatness of optical frequency comb are studied. The results show that the numerical calculation is in good agreement with the experimental results. By adjusting the amplitude of RF drive signal and the attenuation coefficient of optical attenuator, a high-performance optical frequency comb with 15 comb lines, 0.8 dB flatness and 5.05 dB side-mode suppression ratio (SMSR) can be generated. After the filter is introduced into the scheme, the flatness and SMSR can be increased by 62.5% and 61.4% respectively on the premise that the number of comb lines remains unchanged.

**Key words:** optical frequency comb; phase modulator (PM); optical attenuator; flatness

## 1 引言

光频梳在密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)、正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)、超短脉冲及任意波形产生等光通信领域具有重要应用价值<sup>[1,2]</sup>,而如何产生梳线数量大、平坦度高和较优边模抑制比(side-mode suppression ratio,

SMSR)的光频梳成为近年来的研究热点<sup>[3-5]</sup>。相关研究学者提出了一系列光频梳产生方案,其中应用最广泛的是利用外调制器产生高性能光频梳<sup>[6-10]</sup>。文献[11]采用双平行马赫-曾德调制器(dual-parallel Mach-Zehnder modulator, DPMZM)与两个相位调制器(phase modulator, PM)级联的方式产生了梳线数量为 35、平坦度小于 1 dB 的光频梳,但复杂的级联结构及偏压控制电路降低了

\* E-mail: wswxb8@163.com

收稿日期:2022-03-24 修订日期:2022-05-12

基金项目:河北省高等学校技术研究项目(ZC2021248)资助项目

系统稳定性,提高了系统实现成本。文献[12]提出了一种利用高斯波形驱动级联马赫-曾德调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)和电吸收调制器(electro-absorption modulator, EAM)实现宽带光频率梳的方法,虽然产生了35条梳线的光频梳,但平坦度劣化到2.14 dB,同时对MZM和EAM也需要复杂的控制电路以保证光频梳的稳定性。文献[13]利用DPMZM和两个强度调制器(intensity modulation, IM)三级级联的方式产生光频梳,获得了72条梳线,而复杂的射频(radio frequency, RF)相乘电路降低了方案的可行性。文献[14]利用偏振调制器(polarization modulator, PolM)和DPMZM级联实现了高性能的光频梳,其缺点与文献[13]类似,射频驱动信号的产生也由相乘电路来完成,大大增加了方案实现成本,降低了系统稳定性。文献[15]利用大功率射频信号驱动两个级联的PM以产生频率间距为25GHz的光频梳,平坦度较差和射频功耗过大成为该方案最大的不足。为进一步降低系统复杂度并提高光频梳平坦特性,设计了一种基于级联PM和光衰减器的光频梳产生方案。本方案结构简单,实现成本低,无需复杂的偏压控制电路,且PM调制指数小,功率转换效率高,有效减少了射频功耗,通过调整射频驱动信号幅度和光衰减器衰减系数,可产生高性能光频梳,而在方案中引入滤波器后可以进一步优化光频梳特性。

## 2 系统模型

基于级联相位调制器和光衰减器的光频梳产生

方案如图1所示,整个系统根据两个相位调制器PM1和PM2的位置分成两级相串联的子系统。射频源RF输出频率为 $\omega_1$ 的射频信号,并经过电功率分配器将其分为两路,下支路射频信号加载到PM1上,上支路射频信号经过5倍频和电衰器衰减后加载到第二级PM2上。在第一级子系统中主要包括激光器、光功率分配器、PM1、光衰减器和光合路器等光器件。首先激光器输出的连续激光信号通过光功率分配器分为两路,上支路信号注入PM1,下支路信号通过光衰减器调控其强度,随后上下两路光信号由光合路器进行合路。在第二级子系统中,由第一级输出的预调制光信号经PM2再调制后获得高平坦性光频梳,最后由测试设备进行光频梳性能分析。在第一级子系统中PM1和光衰减器并联,通过调整光衰减器衰减系数和PM1调制指数(即PM1射频驱动信号幅度),获得梳线数量少但平坦性较好的光频梳;随后在第二级子系统中通过调整PM2射频驱动信号幅度,进一步提升光频梳梳线数量及平坦特性,最终获取高性能光频梳。

在第一级子系统中激光器输出信号为:

$$E_1(t) = E_0 \exp(j\omega_c t), \quad (1)$$

式中, $E_0$ 和 $\omega_c$ 分别为连续激光信号强度和角频率。

经过光功率分配器均分后,上下支路光信号 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 皆为式(2):

$$E_1(t) = E_2(t) = \frac{\sqrt{2E_0}}{2} \exp(j\omega_c t), \quad (2)$$

随后 $E_1(t)$ 注入到相位调制器PM1,输出光信号表达式为:

$$E_{o1}(t) = E_1(t) = \exp[j\Delta\phi_1 E_{r1}(t)], \quad (3)$$

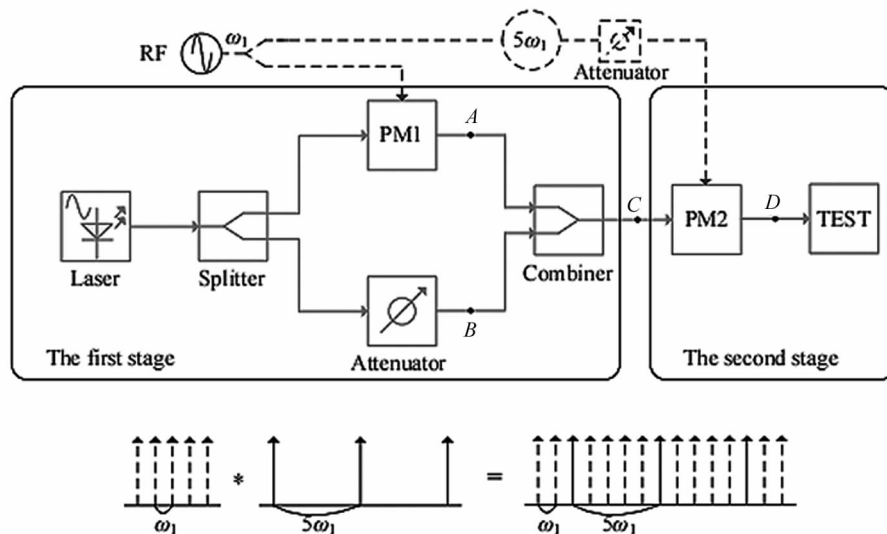


图1 基于级联相位调制器和光衰减器的光频梳产生方案

Fig. 1 Optical frequency comb generation scheme based on cascaded phase modulator and optical attenuator

式中,  $\Delta\phi_1$  为相位调制器 PM1 的相位偏移量, 在分析时设定其为  $\pi/2$ ,  $E_{r1}(t) = A_{r1} \cos(\omega_1 t)$  为驱动 PM1 的射频信号,  $A_{r1}$  为射频信号幅度,  $\omega_1$  为射频信号角频率。

下支路信号  $E_2(t)$  经过光衰减器后为:

$$E_{o2}(t) = E_2(t)10^{-\alpha/20}, \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  为光衰减器衰减系数。再将  $E_{o1}(t)$  和  $E_{o2}(t)$  经光合路器合路后可得:

$$E_{o3}(t) = E_{o1}(t) + E_{o2}(t) = E_1(t) \{10^{-\alpha/20} + \exp[j\Delta\phi_1 E_{r1}(t)]\}. \quad (5)$$

结合式(3)和式(5),  $E_{o3}(t)$  通过第二个相位调制器 PM2 后输出  $E_o(t)$  为:

$$E_o(t) = E_{o3}(t) \exp[j\Delta\phi_2 E_{r2}(t)] = E_1(t) \{10^{-\alpha/20} + \exp[j\Delta\phi_1 E_{r1}(t)]\} \exp[j\Delta\phi_2 E_{r2}(t)], \quad (6)$$

式中,  $\Delta\phi_2 = \Delta\phi_1 = \pi/2$ ,  $E_{r2}(t) = A_{r2} \cos(5\omega_1 t)$  为第二路射频信号, 其幅度为  $A_{r2}$ , 角频率 5 倍于第一路射频信号。由信号理论可知时域相乘则频域对应为卷积, 故式(6)可以理解为两个已调信号在时域内相乘, 对应频域即为卷积运算, 如图 1 中插图所示。将式(6)经 Jacobi-Anger 展开后可得式(7):

$$E_o(t) = E_1(t) \left[ 10^{-\alpha/20} + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J_n(m_1) \exp(jn\omega_1 t) \right] \sum_{k=-\infty}^{+\infty} j^k J_k(m_2) \exp(jk5\omega_1 t) = 10^{-\alpha/20} \sqrt{2E_0}/2 \sum_{l=-\infty}^{+\infty} j^l J_l(m_2) \exp[j(\omega_c + 5l\omega_1)t] + \sqrt{2E_0}/2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} j^{(n+k)} J_n(m_1) J_k(m_2) \exp[j(\omega_c + (n+5k)\omega_1)t]. \quad (7)$$

在式(7)中的  $n, k$  和  $l$  取值为  $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$ ,  $m_1 = \Delta\phi_1 A_{r1}$  和  $m_2 = \Delta\phi_2 A_{r2}$  为相位调制器 PM1 及 PM2 的调制指数,  $J_n, J_k$  和  $J_l$  分别为  $n, k$  和  $l$  阶第一类贝塞尔函数。在式(7)中满足  $n+5k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$  的各  $\sqrt{2E_0} j^{(n+k)} J_n(m_1) J_k(m_2)/2$  累加项, 分别对应主载波、 $\pm 1$  阶边带、 $\pm 2$  阶边带、 $\pm 3$  阶边带和  $\pm 4$  阶等各阶边带谱线幅度, 特别当满足  $n+5k=5l=0, \pm 5, \pm 10, \pm 15, \pm 20, \dots$  时, 对应的累加项还需加上  $\sqrt{2E_0} j^l 10^{-\alpha/20} J_l(m_2)/2$  项。在式(7)中各阶边带谱线功率决定于光衰减器  $\alpha$ 、PM1 调整指数  $m_1$  和 PM2 调整指数  $m_2$ , 故合理调整  $\alpha, m_1$  和  $m_2$  可在有效带宽内获得高平坦特性的光频梳。由前述可知  $m_1 = \Delta\phi_1 A_{r1}, m_2 = \Delta\phi_2 A_{r2}$ , 且  $\Delta\phi_2 =$

$\Delta\phi_1 = \pi/2$ , 故调整两路射频驱动信号幅度  $A_{r1}$  和  $A_{r2}$  即可改变  $m_1$  和  $m_2$ 。

### 3 数值计算

在图 1 所示第一级子系统中 PM1 和可调光衰减器并联, 通过调整光衰减器衰减系数和 PM1 射频驱动信号幅度, 可得到窄带宽、高平坦性的光频梳。图 2 给出了衰减系数  $\alpha$  和  $E_{r1}(t) = A_{r1} \cos(\omega_1 t)$  射频信号幅度  $A_{r1}$  与归一化平坦度所对应等高线图, 在坐标  $(5, 1.64)$  和  $(5.2, 2.85)$  处存在两个最优归一化平坦度, 即  $\alpha = 5$  dB、 $A_{r1} = 1.64$  V, 或  $\alpha = 5.2$  dB、 $A_{r1} = 2.85$  V, 可获得最优光频梳。

图 3 给出了第一类贝塞尔函数曲线, 横坐标采用幅度, 调制指数与幅度的转换关系可由  $m_1 = \Delta\phi_1 A_{r1}, m_2 = \Delta\phi_2 A_{r2}$  和  $\Delta\phi_2 = \Delta\phi_1 = \pi/2$  3 个表达式决定。先分析  $\alpha = 5.2$  dB、 $A_{r1} = 2.85$  V 时归一化平坦度最优对应点, 如图 3 所示, 当幅度  $A_{r1} = 2.85$  V 时,  $G_0$  点处  $|J_0| = 0.326$ ,  $G_1$  和  $G_2$  点处则满足  $|J_1| = |J_2| = 0.229$ , 通过调整  $\alpha = 5.2$  dB 可使  $|J_0| = |J_1| = |J_2| = 0.229$ , 结合贝塞尔函数曲线对称性, 表明主载波、 $\pm 1$  阶和  $\pm 2$  阶边带功率相同, 从而可以获得梳线数量为 5 条的高平坦窄带光频梳。但此时  $|J_3| = 0.428, |J_4| = 0.436$ , 而  $|J_5| = 0.191$ , 意味着高阶边带功率与主载波、 $\pm 1$  阶和  $\pm 2$  阶边带功率相当, 甚至还要高出一些, 从而使得光频梳整体平坦性变差。其次, 当射频驱动信号幅度  $A_{r1} = 2.85$  V 时, 其较高的幅度值也进一步增加了系统实现成本, 故  $\alpha = 5.2$  dB、 $A_{r1} = 2.85$  V 方案选用价值不大。

再来分析  $\alpha = 5$  dB、 $A_{r1} = 1.64$  V 的最优搭配, 当选用  $A_{r1} = 1.64$  V 时, 如图 3 所示, 在  $F_2$  点,  $|J_1| = |J_2| = 0.462$ , 而在  $F_1$  点,  $|J_0| = 0.11$ , 可以看出主载

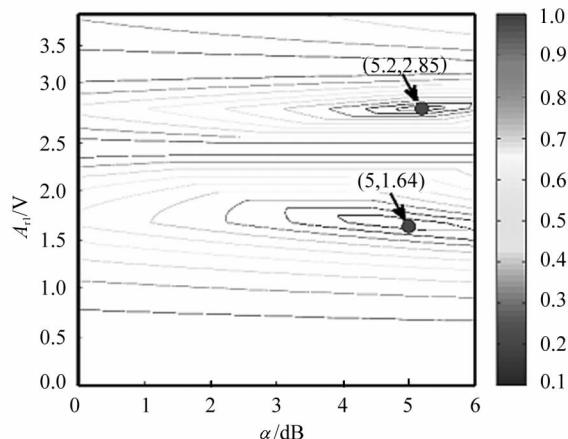


图 2  $\alpha$  和  $A_{r1}$  与归一化平坦度的对应等高线图  
Fig. 2 Contour of the normalized flatness as a function of the  $\alpha$  and  $A_{r1}$

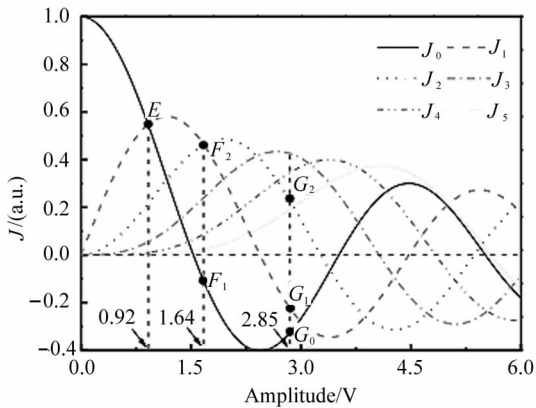


图 3 第一类贝塞尔函数曲线  
Fig. 3 Curves of the first kind Bessel function

波功率低于±1 阶和±2 阶边带功率,通过调整光衰

减器衰减系数,使  $\alpha=5\text{ dB}$ ,将衰减后的  $E_{o2}(t)$  通过合路器与  $E_{o1}(t)$  合路后提升主载波功率,使得  $|J_0|=|J_1|=|J_2|=0.462$ ,整体看其值也明显大于前述中的  $|J_0|=|J_1|=|J_2|=0.229$ ,表现出了较好的功率特性。此时  $|J_3|=0.241$ ,  $|J_4|=0.083$ ,  $|J_5|=0.021$ ,表明±3 阶及以上的边带功率要远低于同功率的主载波、±1 和±2 阶边带,故选用  $\alpha=5\text{ dB}$ 、 $A_{r1}=1.64\text{ V}$  后可获得梳线数量为 5 条的高平坦窄带光频梳。±3 阶及以上光边带虽然功率整体较低,但按照图 1 插图所示进行卷积时,仍会对平坦度产生影响,为进一步提升最终光频梳平坦特性,可在 PM1 后加入光滤波器以滤除±3 阶及以上光边带,从而彻底消除高阶边带的影响,优化后的方案如图 4 所示,所加滤波器在图 4 中用虚线框做了标注。为便于后续分析,将图 1 所述方案称为方案 1,图 4 所述方案称为

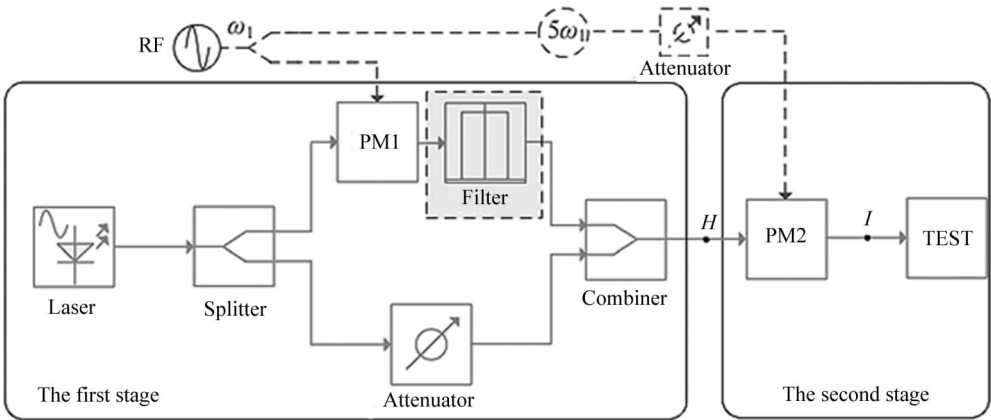


图 4 加入滤波器的光频梳产生方案  
Fig. 4 Optical frequency comb generation scheme with filter

方案 2。

由于第一级子系统通过 PM1 预调制只产生了 5 条梳线,而较少的梳线数量限制了光频梳的应用广度,故在第二级子系统中通过相位调制器 PM2 的再调制,进一步提升梳线数量和光频梳平坦度。当选用  $\alpha=5\text{ dB}$ 、 $A_{r1}=1.64\text{ V}$  后,由第一级子系统所产生的光频梳耦合进 PM2,在射频信号  $E_{r2}(t)=A_{r2}\times\cos(5\omega_1 t)$  驱动下,通过改变射频信号幅度  $A_{r2}$  即可调整 PM2 的调制指数  $m_2$ ,可进一步优化光频梳梳线数量和平坦特性。图 5 为  $\alpha=5\text{ dB}$  时射频信号  $E_{r1}(t)=A_{r1}\cos(\omega_1 t)$  和  $E_{r2}(t)=A_{r2}\cos(5\omega_1 t)$  的幅度  $A_{r1}$  和  $A_{r2}$  与归一化平坦度的对应关系。从图 5 可以看出,在坐标  $(0.92, 1.64)$  位置处存在最优归一化平坦度,即  $A_{r1}=1.64\text{ V}$ 、 $A_{r2}=0.92\text{ V}$ ,在图 5 所示的另外两

个虚线方框所圈区域也存在两个优值,但选用该两个位置时会使得某路射频信号幅度过大,进而增大了射频功耗,提升了系统实现难度,故后续分析中不予考虑。

当  $A_{r2}=0.92\text{ V}$  时,如图 3 中 E 点所示,此时  $|J_0|=|J_1|=0.546$ ,  $|J_2|=0.215$ ,  $|J_3|=0.051$ ,  $|J_4|=0.01$ ,  $|J_5|=0.001$ ,即此时可产生主载波和±1 阶边带 3 条等功率的谱线,而±2 阶及以上边带由于其贝塞尔函数较小导致其功率较低,其作用可以忽略不计。再结合图 1 中插图所示,当两路射频信号的角频率为 5 倍关系时,在卷积过程中可保证梳线不重叠,且各梳线间距相等,皆为  $\omega_1$ ,最终可产生含有 15 谱线的高平坦性光频梳。

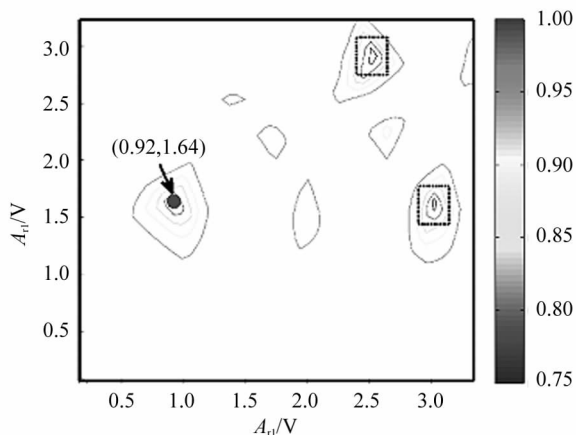


图5  $\alpha=5$  dB 时  $A_{r1}$  和  $A_{r2}$  与归一化平坦度的对应等高线图

Fig. 5 Contour of the normalized flatness as a function of the  $A_{r1}$  and  $A_{r2}$  at  $\alpha=5$  dB

## 4 实验研究

为验证方案1和方案2的正确性,对其进行了系统级验证。激光器中心频率为 193.1 THz,输出功率为 0 dBm,激光器线宽为 10 MHz,初始相位为  $0^\circ$ 。

光衰减器衰减系数  $\alpha=5$  dB,射频信号  $E_{r1}(t)=1.64\cos(6\pi\times 10^9 t)$ ,  $E_{r2}(t)=0.92\cos(30\pi\times 10^9 t)$ ,即两路射频信号频率分别为 3 GHz 和 15 GHz。相位调制器 PM1 和 PM2 的相位偏移量  $\Delta\phi_1=\Delta\phi_2=\pi/2$ ,采用光谱仪进行光频梳性能观测。

图6给出了图1中A、B、C和D点处的光谱图。在图6(a)中,主载波功率远低于 $\pm 1$ 阶和 $\pm 2$ 阶边带功率,且 $\pm 1$ 阶和 $\pm 2$ 阶边带功率相等,该结果与前述理论分析一致。图6(b)是经光衰减器修正后的光信号,该信号与图6(a)中主载波经过合路器相加后,可使图6(a)中主载波功率与 $\pm 1$ 阶和 $\pm 2$ 阶边带功率相等,结果如图6(c)所示,从而获得了平坦度较好的5条光频梳,其SMSR为6.14 dB。较小的SMSR会导致高阶边带在后续光频梳生成中产生影响,降低光频梳平坦度,故在方案2中滤除了 $\pm 3$ 阶及以上光边带,以优化最终光频梳平坦度。当图6(c)所示窄带光频梳再耦合进第二级子系统PM2后,此时该窄带光频梳中每一条梳线都相当于一个光源,激励出3条平坦梳线,由于驱动PM2的射频信号频率为

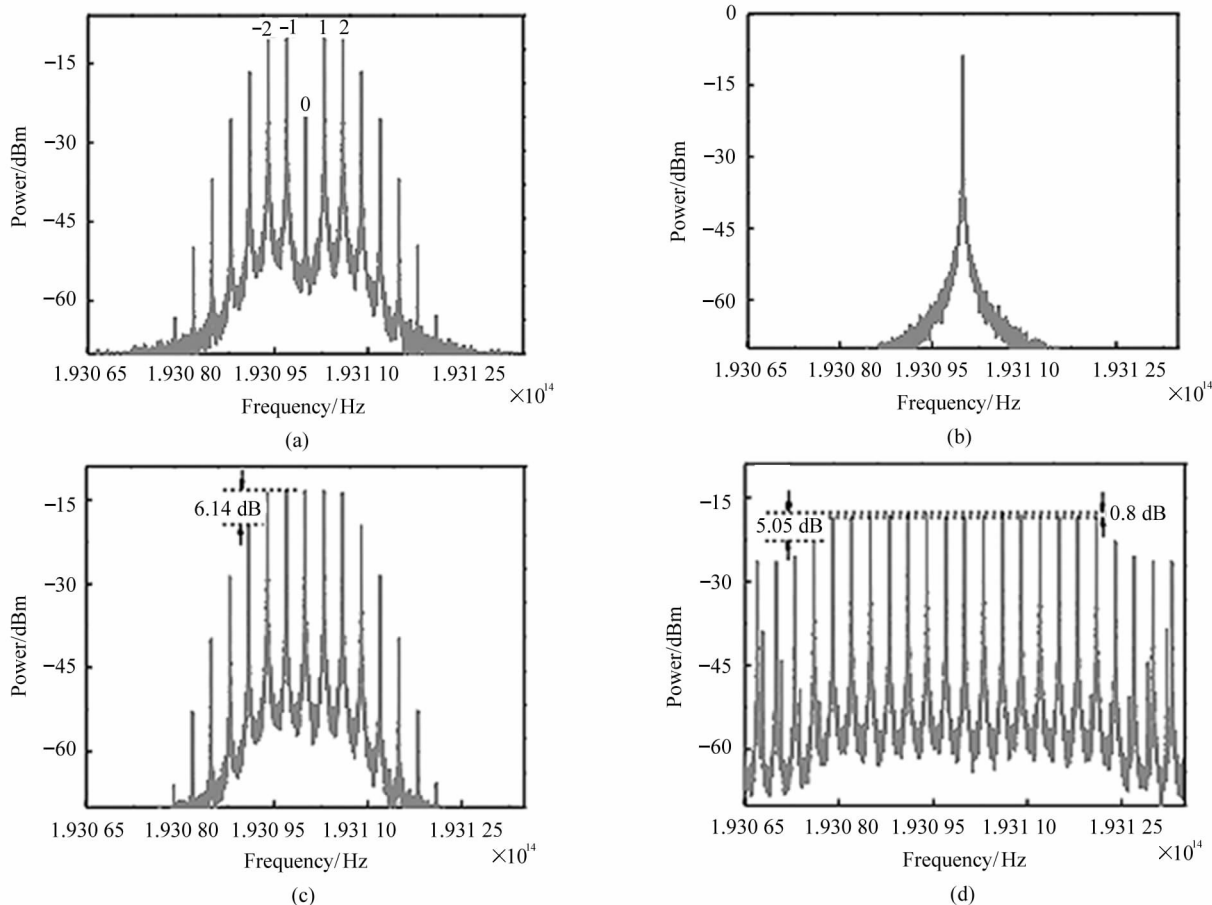


图6  $\alpha=5$  dB、 $A_{r1}=1.64$  V 时方案1中不同位置处的光谱图:(a) A 处;(b) B 处;(c) C 处;(d) D 处

Fig. 6 Spectral diagram at different locations in scheme 1 when  $\alpha=5$  dB,  $A_{r1}=1.64$  V:(a) A location;(b) B location;(c) C location;(d) D location

驱动 PM1 射频信号频率的 5 倍,最终可产生 15 条平坦的梳线,如图 6(d)所示。在图 6(d)中 15 条梳线的平坦度为 0.8 dB,SBSR 为 5.05 dB,与图 6(c)相比,SBSR 降低了 17.75%,主要是由图 6(c)中 $\pm 3$ 阶及以上边带所引起的。

当选取  $\alpha=5.2$  dB、 $A_{r1}=2.85$  V 时,对方案 1 也进行了研究,图 7 为图 1 中 C 和 D 点处对应的光谱

图。从图 7(a)可以看出,该取值方式确实可以获得主载波、 $\pm 1$  阶和  $\pm 2$  阶边带功率相等的光频梳,但此时 $\pm 3$ 阶和 $\pm 4$ 阶边带功率远大于主载波、 $\pm 1$  阶和 $\pm 2$ 阶边带,从而造成整体平坦特性变差,该实验结果与前述理论分析完全一致。而这些高阶边带又导致图 7(b)中最终所产生的光频梳平坦度和 SBSR 急剧变差,故第一级系统中  $\alpha=5.2$  dB 和  $A_{r1}=$

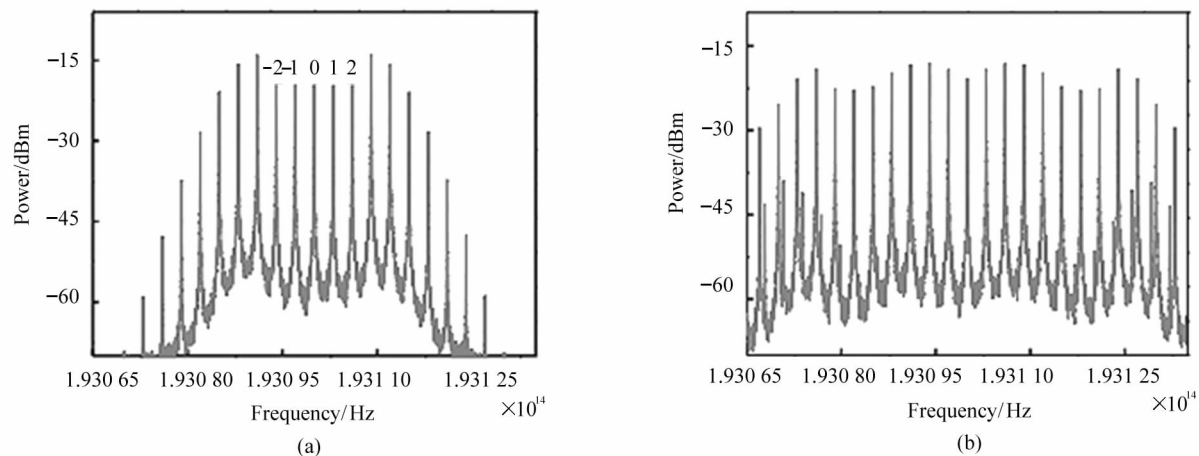


图 7  $\alpha=5.2$  dB、 $A_{r1}=2.85$  V 时方案 1 中不同位置处的光谱图:(a) C 处;(b) D 处

Fig. 7 Spectral diagram at different locations in scheme 1 when  $\alpha=5.2$  dB、 $A_{r1}=2.85$  V:(a) C location;(b) D location

2.85 V 的取值方案需舍去。

图 8 给出了对方案 2 实验后第一级子系统和第二级子系统输出端的光谱图(如图 4 所示 H 和 I 点处),对比图 6(c)和图 8(a)可以看出,经过滤波器滤波后 $\pm 3$ 阶及以上边带被滤除,在实验时滤波器为矩形滤波器,带宽为 15 GHz,插入损耗为 0 dB。图 8 (b)为方案 2 最终所产生的大平坦度光频梳,其有效

带宽内的平坦度为 0.3 dB,SMSR 为 8.15 dB,相对于图 6(d)其平坦度和 SMSR 分别提高了 62.5%和 61.4%。平坦度和 SMSR 的提升可归因于图 8(a)中 $\pm 3$ 阶及以上边带的滤除,原因是单独分析 $\pm 3$ 阶及以上每条高阶边带时,功率都较低,但随着项数的增多,按式(7)累加后其影响增大,最终导致平坦度和 SMSR 变差,故滤除 $\pm 3$ 阶及以上高阶边可有效提升

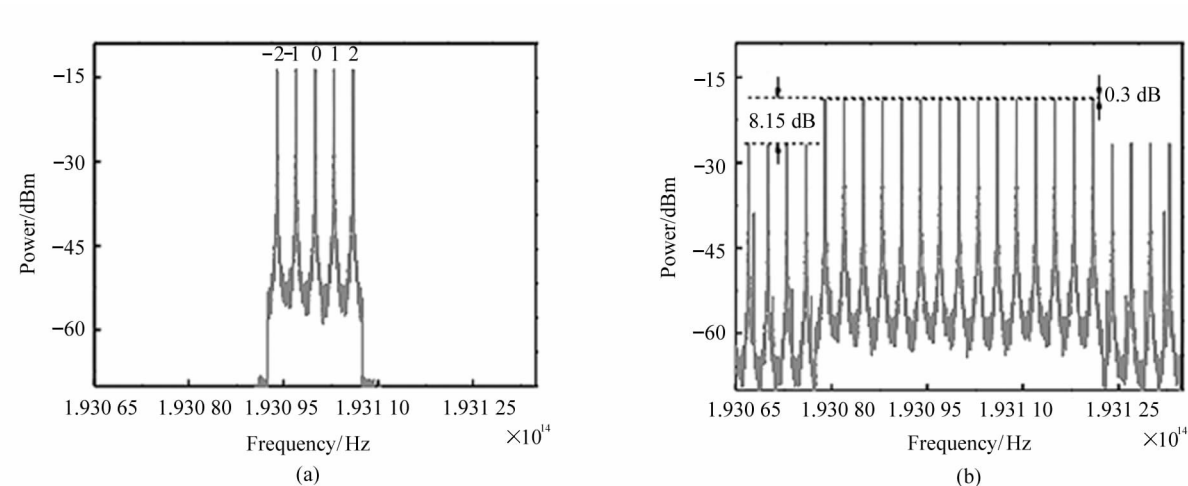


图 8 方案 2 中不同位置处的光谱图:(a) H 处;(b) I 处

Fig. 8 Spectral diagram at different locations in scheme 2:(a) H location;(b) I location

光频梳平坦度和 SMSR。

## 5 影响分析

如前所述,在方案1中,当 $\alpha=5$  dB、 $A_{r1}=1.64$  V和 $A_{r2}=0.92$  V时可以获得高平坦性光频梳,在方案2中,采用相同的取值方案可以获得更优的光频梳,即 $\alpha$ 、 $A_{r1}$ 和 $A_{r2}$ 会对光频梳产生起决定性作用,因此讨论 $\alpha$ 、 $A_{r1}$ 和 $A_{r2}$ 的扰动对光频梳的影响具有现实意义。

图9(a)给出了当 $A_{r2}=0.92$  V和 $\alpha=5$  dB时 $A_{r1}$ 变化对两种方案所产生的光频梳平坦度的影响,可以看出:当 $A_{r1}$ 小于1.6 V时,两种方案的光频梳平坦度变化较为近似,从1 V增大到1.6 V时,方案1所产生的光频梳平坦度从12.09 dB提升到0.83 dB,而方案2则从12.41 dB提升到1.21 dB。当 $A_{r1}$ 大于1.6 V后,两种方案的平坦度差距增大,在 $A_{r1}=1.7$  V时,方案1的平坦度为1.8 dB,而方案2的平坦度则为0.6,平坦特性有了极大提升,其中插图 $A_{r1}=1.65$  V时两种方案所产生的光频梳。图9(b)示出了 $A_{r1}=1.64$  V和 $\alpha=5$  dB时 $A_{r2}$ 变化对两种方案所产生的光频梳的影响,可以看出,两种方案的平坦度变化趋势基本相似,两条曲线也较为重合,表明 $A_{r2}$ 变化对两种方案的平坦度影响基本相同。当 $A_{r2}$ 从0.5增大到0.9时,方案1所产生的光频梳平坦度从7.7 dB提升到0.9 dB,而方案2则从7.8 dB提升到0.7 dB。当 $A_{r2}$ 从0.9增大到1.5时,则方案1和方案2所产生的光频梳平坦度分别劣化到21.9 dB和27.5 dB,如图9(b)中插图所示。图9(c)给出了 $A_{r1}=1.64$  V和 $A_{r2}=0.92$  V时光衰减器衰减系数 $\alpha$ 变化对光频梳平坦度的影响,插图 $\alpha=5.5$  dB时两种方案所产生的光频梳。可以看出其变化趋势与图9(a)类似,即当 $\alpha$ 小于5 dB时,方案1平坦特性稍好,当 $\alpha$ 大于5 dB后,方案2所产生的光频梳平坦特性较优。

表1给出了平坦度扰动最高为2 dB时 $A_{r1}$ 、 $A_{r2}$ 和 $\alpha$ 的可允许变化范围,在分情况讨论时只考虑当前分析量变化,另两个量保持最优值不变。由表1可以看出:对 $A_{r1}$ 扰动来说,方案2具有更大的容忍宽度,而对于 $A_{r2}$ 扰动,则两种方案容忍宽度相同,即 $A_{r2}$ 扰动对两种方案的影响是相同的。在表1中,当平坦度扰动最高为2 dB时,方案1对 $A_{r1}$ 和 $A_{r2}$ 具有相同的容忍宽度,方案2则对 $A_{r1}$ 扰动的容忍宽度更大。对 $\alpha$ 扰动来说,方案2同样具有更大的容忍范围。整体看,方案2稳定性更强,事实上方案2的平

坦特性和稳定性的提升是因为加入滤波器后滤出了高阶边带的影响所导致的,而滤波器的引入会提升系统复杂度,增加系统实现成本,故在实际应用中应根据不同需求进行不同方案的选取。

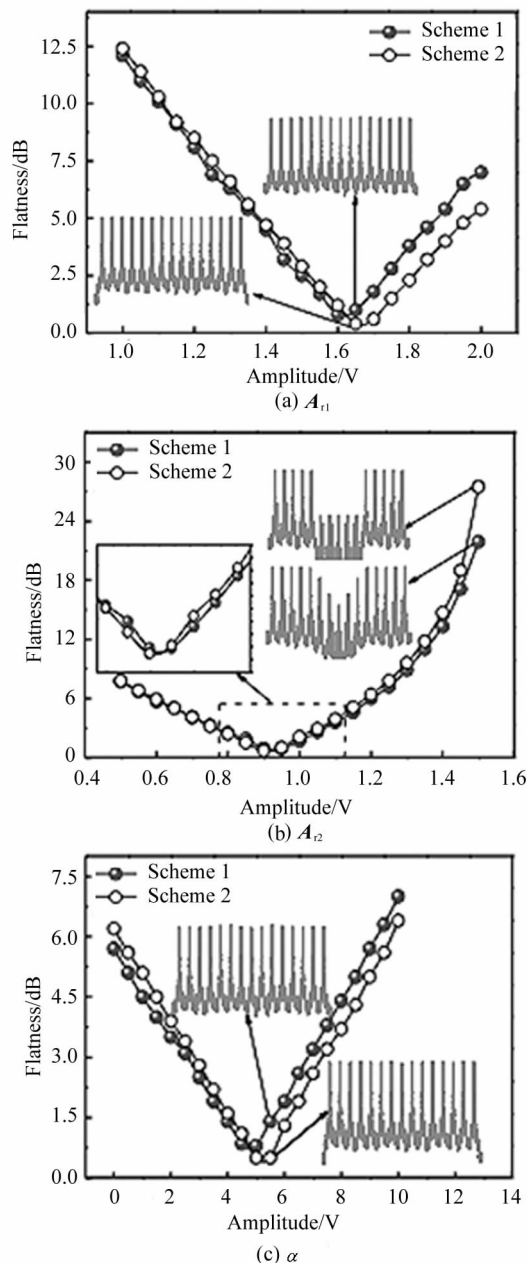


图9 参数变化对平坦度的影响

Fig. 9 Influence of parameter variation on flatness

## 6 结论

设计了一套基于级联相位调制器和光衰减器的光频梳产生方案,在第一级子系统中相位调制器PM1和光衰减器并联,通过调整PM1射频驱动信号幅度 $A_{r1}$ 和光衰减器衰减系数 $\alpha$ 产生5条平坦梳

表 1 平坦度最高为 2 dB 时两种方案中  $A_{r1}$ 、 $A_{r2}$  和  $\alpha$  的扰动范围

Tab. 1 Disturbance range of  $A_{r1}$ 、 $A_{r2}$  and  $\alpha$  in the two schemes when the flatness is up to 2 dB

| Type     | Scheme 1 disturbance range | Scheme 2 disturbance range |
|----------|----------------------------|----------------------------|
| $A_{r1}$ | 1.53—1.71 V(0.18 V)        | 1.55—1.78 V(0.23 V)        |
| $A_{r2}$ | 0.84—1.02 V(0.18 V)        | 0.82—1 V(0.18 V)           |
| $\alpha$ | 3.41—6.07 dB(2.66 dB)      | 3.65—6.58 dB(2.93 dB)      |

线,再通过调整第二级相位调制器 PM2 射频驱动信号幅度  $A_{r2}$  以提升光频梳梳线数量,最终产生梳线数量为 15 条、平坦度为 0.8 dB, SMSR 为 5.05 dB 的光频梳。在优化方案中,通过在 PM1 后加入滤波器以滤波高阶边带的影响,可以产生性能更为优异的光频梳,在梳线数量保持不变的前提下,其平坦度和 SMSR 可分别提高 62.5% 和 61.4%。最后讨论了射频驱动信号幅度  $A_{r1}$ 、 $A_{r2}$  和光衰减器衰减系数  $\alpha$  对光频梳平坦度的影响,结果表明:方案 2 性能更优,但滤波器的引入会增加系统复杂度并提升系统实现成本,故在实际应用中应根据需求进行不同方案的选取。本方案结构简单,实现成本低,无需复杂的控制电路即可产生大平坦度的光频梳,为实际光频梳产生提供了理论指导和优选方案。

参考文献:

[1] 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(7): 102581.

[2] WEI M M, GUO W G, YAN L L, et al. Research on generation based on frequency locking of Erbium-doped fiber femtosecond optical comb[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(3): 317-322.

魏明明, 郭文阁, 闫露露, 等. 掺铒光纤飞秒光梳频率锁定研究[J]. 光电子 • 激光, 2021, 32(3): 317-322.

[3] XU Y, SHARPLES A, FATOME J, et al. Frequency comb generation in a pulse-pumped normal dispersion Kerr mini-resonator[J]. Optics Letters, 2021, 46(3): 512-515.

[4] LESKO D, TIMMERS H, XING S, et al. A six-octave optical frequency comb from a scalable few-cycle erbium fibre laser[J]. Nature Photonics, 2021, 15(4): 281-286.

[5] LI D, WU S, LIU Y, et al. Flat optical frequency comb generation based on a dual-parallel Mach-Zehnder modulator and a single recirculation frequency shift loop[J]. Applied Optics, 2020, 59(7): 1916-1923.

[6] ULLAH R, ULLAH S, KHAN G Z, et al. Ultrawide and tunable self-oscillating optical frequency comb generator based on an optoelectronic oscillator[J]. Results in Physics, 2021, 22: 103849.

[7] HE X, ZHANG P, ZHANG Y, et al. Wavelength-tunable ultra-stable optical frequency comb based on all-polarization-maintaining fiber laser [J]. Frontiers in Physics, 2020, 8: 226.

[8] SHARMA V, SINGH S, LOVKESH, et al. Demonstration of optical frequency comb generation using four-wave mixing in highly nonlinear fiber[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2021, 241(17): 166948.

[9] ROIZ M, KUMAR K, KARHU J, et al. Simple method for mid-infrared optical frequency comb generation with dynamic offset frequency tuning[J]. APL Photonics, 2021, 6(2): 026103.

[10] JAIN G, GUTIERREZ-PASCUAL D, WALLACE M J, et al. Experimental investigation of external optical injection and its application in gain-switched wavelength tunable optical frequency comb generation[J]. Journal of Light-wave Technology, 2021, 39(18): 5884-5895.

[11] TRAN T T, SONG M, SEO D S. Highly flat optical comb generation based on DP-MZM and phase modulators[J]. Electronics Letters, 2019, 55(1): 43-45.

[12] FAN Y, LI P. Optical frequency comb based on cascaded MZM-EAM with Gaussian-shaped pulse signal[J]. Optics Engineering, 2021, 60(5): 056106.

[13] ZHANG T, WU S. Optical frequency comb generation based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator and intensity modulator with RF frequency multiplication circuit [J]. Photonic Network Communications, 2018, 36(2): 256-262.

[14] 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.

[15] YU J, LI K, CHEN Y, et al. Terahertz-wave generation based on optical frequency comb and single Mach-Zehnder modulator [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(1): 1-8.

作者简介:  
王现彬 (1981—),男,博士,副教授,主要从事光通信方面的研究。