

# 激光与光电子学进展

## 基于单个强度调制器产生宽光学频率梳系统的研究

高军萍<sup>1,2</sup>, 赵盟盟<sup>1,2</sup>, 卢嘉<sup>1,2\*</sup>, 刘剑飞<sup>1,2</sup>, 何静飞<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401;

<sup>2</sup>天津市电子材料与器材重点实验室, 天津 300401

**摘要** 提出了基于双边带调制方式利用单个马赫-曾德尔调制器(MZM)生成平坦宽光学频率梳的方案。两个激光器的频率差直接决定了双边带调制后光学频率梳产生的频谱宽度与质量,通过理论分析不同调制系数下各阶边带间的标准差以及各阶边带的贝塞尔值,发现5阶以上的边带对宽光学频率梳的影响可以忽略不计。而功率较低的5阶边带会叠加在各阶边带上,使得各阶边带的功率得以补偿或抵消,从而减小高阶边带对光学频率梳的影响,提升平坦度。仿真得到的宽光学频率梳的平坦度达到3.7 dB,有效频谱宽度为700 GHz。将传输速率为5 Gbit/s的不归零码数据调制到此光学频率梳上,经过光纤传输后,眼图依然清晰可见,在 $10^{-9}$ 量级误码率下功率代价小于1.8 dB。这样的光学频率梳在光通信中可传送更多的数据信息,实现了高速数据传输并保持了光学频率梳的平坦度,稳定性能较好,成本低廉。

**关键词** 集成光学; 光学频率梳; 强度调制器; 平坦度; 双边带调制

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0913001

## Wide Optical Frequency Comb System Based on Single Intensity Modulator

Gao Junping<sup>1,2</sup>, Zhao Mengmeng<sup>1,2</sup>, Lu Jia<sup>1,2\*</sup>, Liu Jianfei<sup>1,2</sup>, He Jingfei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

<sup>2</sup>Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials & Devices, Tianjin 300401, China

**Abstract** This paper proposes a scheme which uses a single Mach-Zehnder modulator (MZM) to generate a flat and wide optical comb based on the double-sideband modulation method. The frequency difference between two lasers directly determines the spectral width and quality of this comb after double-sideband modulation. Through the theoretical analysis of the standard deviation between the sidebands of different orders under different modulation coefficients and the Bessel value of each order sideband, we find sidebands above the fifth order have a negligible effect on the wide comb. The lower-power fifth-order sidebands are superimposed on the sidebands of different orders, so that the powers of the sidebands of different orders can be compensated or cancelled, thereby reducing the influence of the higher-order sidebands on the optical frequency comb and improving the flatness. The flatness of the wide optical comb obtained by simulation reaches 3.7 dB, and the effective spectral width is 700 GHz. After the non-return to zero data with transmission rate of 5 Gbit·s<sup>-1</sup> is

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-09-02; 录用日期: 2020-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(61801164)、天津市自然科学基金(18JCQNJC01700)、河北省自然科学基金(F2019202387)、河北省教育厅重点项目(ZD2020304)

\*E-mail: [lujia8299@163.com](mailto:lujia8299@163.com)

modulated on this optical comb and transmitted through an optical fiber, the eye diagram is still clearly visible, and the power penalty is less than 1.8 dB at the bit error rate level of  $10^{-9}$ . Such an optical comb can transmit more data information in optical communications, realize high-speed data transmission and maintain the flatness of the optical comb with good stability and low cost.

**Key words** integrated optics; optical frequency comb; intensity modulator; flatness; double-sideband modulation

**OCIS codes** 130.4110; 230.0250; 060.4320

## 1 引言

光学频率梳(OFC)由一定数量、频率间隔相等并且振幅高度相同的光学频率分量构成<sup>[1-3]</sup>。在光通信系统中,OFC具有高频率稳定性和高光谱分辨率的特点<sup>[4-5]</sup>,可用来抑制受激布里渊散射(SBS),大幅提高时间测量精度、系统信噪比和传输距离<sup>[6-8]</sup>。产生光学频率梳的技术有很多,如循环频移器(RFS)环路<sup>[9]</sup>、基于非线性效应的光学超连续介质技术<sup>[10]</sup>、锁模激光器法、自反馈振荡技术<sup>[11]</sup>、不同类型调制器级联<sup>[12-14]</sup>等。在RFS方案中,高频放大器的简化使其得以应用于实际,但由于每次往返都会有噪声积累,因此网络设计者需采用噪声抑制技术<sup>[15]</sup>。在超连续介质技术中,光谱和时间波动导致其不稳定,不适用于高速光通信系统<sup>[16]</sup>。锁模激光器法是利用锁模技术得到超短脉冲信号,再利用时间和频率域的关系,将其转变为频率域的光学频率梳。该方法系统设计结构简单,得到的梳线数量较多,但平坦度较差,且锁模激光器的锁模条件严苛,不易被满足<sup>[17]</sup>。克尔光学频率梳是利用微型谐振腔中的非线性光学克尔效应,将单一频率的激光转变为包含大量等间隔频率的宽带光学频率梳,在时域中输出超短孤子脉冲序列<sup>[18]</sup>。相对于传统光学频率梳光源,克尔光学频率梳具有可片上集成、脉冲重复频率高等优点,但克尔光学频率梳的能量转换效率非常低。基于微环谐振腔也可产生平坦的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<sup>[19]</sup>。外部调制技术凭借性能稳定、适用于高速传输等优势而日益受到重视<sup>[20]</sup>,研究者采用各种外部调制器来产生光梳,如相位调制器(PM)、强度调制器、马赫-曾德尔调制器(MZM)和电吸收调制器等<sup>[21]</sup>。在外部调制中,PM简单易操作,但是OFC会受到调制深度的影响,很难得到更宽的范围。有研究者采用级联两

个MZM和一个PM的结构,产生了频谱间隔为12.5 GHz的16根谱线<sup>[22]</sup>,该方案产生的光学频率梳的平坦度不够好且结构较为复杂;还有研究者采用双并联MZM生成7条平坦度小于2 dB的梳状线<sup>[23]</sup>;采用与相位调制器级联的偏振调制器产生11条平坦度为2.1 dB的梳状线<sup>[24]</sup>。文献[25]利用单个偏振控制器产生光学频率梳,平坦度小于3 dB,但梳线数目较少。

在这些技术中,随着梳状线数目的增加,频谱平坦度降低,有效频谱宽度缩小。在利用外部调制器生成光学频率梳的方案中,多个调制器级联的方式虽然增加了光学频率梳的谱线数量,但会造成调制效率降低,插入损耗增加,不利于光学频率梳系统的后续拓展。为了简化系统结构,生成谱线数目较多的光学频率梳,本文提出了扩展性更强的生成宽光学频率梳的方法,利用两个激光器耦合,通过单个强度调制器调制来产生光学频率梳。这样的光学频率梳的频谱更宽,可提高光学精密测量的精度,在光通信中可传送更多的数据信息。该系统实现了高速数据传输并保持了OFC的平坦度,稳定性能较好,成本更低。

## 2 系统原理及理论分析

### 2.1 基于单个马赫-曾德尔调制器的宽光学频率梳系统

图1为基于单个马赫-曾德尔调制器生成宽光学频率梳的原理图,其中CW为连续光,OC为耦合器,DP-MZM为双端口-MZM,PD为电光检测器,NRZ为不归零码。两路连续光CW1与CW2经光耦合器耦合后可以表示为

$$E_m = E_0 [\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)], \quad (1)$$

式中: $E_m$ 为两路连续光耦合后的光波信号; $E_0$ 为连续光的光强; $\omega_i (i=1, 2)$ 为第*i*个连续光的角频率; $t$ 为时间。A点为MZM的输入,对应的频谱示意图如图1(b1)所示。

每个连续光经MZM调制后的输出表示为

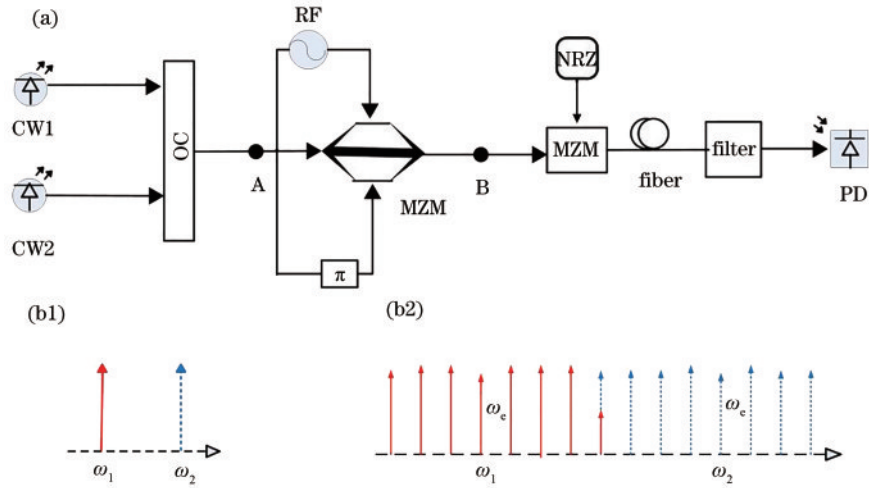


图1 系统原理图与光学频率梳光谱图。(a)原理图;(b1)MZM的输入与(b2)输出载波光谱图

Fig. 1 Principle diagram of system and spectra of optical frequency comb. (a) Principle diagram; (b1) input and (b2) output carrier spectra of MZM

$$\begin{aligned}
 E_{out} = & E_0 \cos(\omega_i t) \gamma \exp \left[ j\pi \frac{V_{RF} \cos(\omega_e t + \varphi)}{V_\pi} + j\pi \frac{V_{bias1}}{V_{DC}} \right] + \\
 & E_0 \cos(\omega_i t) (1 - \gamma) \exp \left[ j\pi \frac{V_{RF} \cos(\omega_e t + \varphi + \theta)}{V_\pi} + j\pi \frac{V_{bias2}}{V_{DC}} \right] = \\
 & \frac{1}{2} E_0 \cos(\omega_i t + \phi_1) \left\{ J_0(\beta) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta) \cos[2n(\omega_e t + \varphi)] \right\} - \\
 & \frac{1}{2} E_0 \sin(\omega_i t + \phi_1) \left\{ (-2) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta) \cos[(2n-1)(\omega_e t + \varphi)] \right\} + \\
 & \frac{1}{2} E_0 \cos(\omega_i t + \phi_2) \left\{ J_0(\beta) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta) \cos[2n(\omega_e t + \varphi + \theta)] \right\} - \\
 & \frac{1}{2} E_0 \sin(\omega_i t + \phi_2) \left\{ (-2) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta) \cos[(2n-1)(\omega_e t + \varphi + \theta)] \right\}
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中： $\gamma$ 为功率的分光比，一般情况下设定为1/2； $V_{RF}$ 为射频信号的振幅； $V_{bias1}$ 、 $V_{bias2}$ 分别为两个分支臂上的直流偏置电压； $V_\pi$ 为射频半波电压； $V_{DC}$ 为直流半波电压； $\omega_e$ 为射频信号的角频率； $\varphi$ 为射频信号的相位； $\theta$ 为两个分支臂的相位差； $\beta$ 为马赫-曾德尔调制器的调制系数， $\beta = \pi V_{RF} / V_\pi$ ； $J_n(\beta)$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) 是  $\beta$  的第  $n$  阶贝塞

尔函数。B点为两条连续光经MZM调制后的输出，对应的光学频率梳的频谱示意图如图1(b2)所示。通过设置(2)式中的参数可以实现不同的调制方式。

当两臂相位差 $\theta = \pi$ ，直流电压导致的相位偏转为 $\pi(V_{bias1} - V_{bias2}) / V_{DC} = \pi/2$ ，射频信号的初始相位为0时，可实现双边带调制。经过调制后输出表达式为

$$\begin{aligned}
 E_{out} = & E_0 \cos(\omega_i t) + E_0 J_1(\beta) \left[ \cos(\omega_i t + \omega_e t) + \cos(\omega_i t - \omega_e t) \right] + \\
 & E_0 J_2(\beta) \left[ \cos(\omega_i t + 2\omega_e t) + \cos(\omega_i t - 2\omega_e t) \right] + \dots
 \end{aligned} \tag{3}$$

## 2.2 影响系统的性能分析

根据(3)式可知，调制系数决定各阶边带的幅值，进而决定平坦度。在保证平坦度的基础上，根

据贝塞尔函数曲线(图2)选取系数，以获得较多数量的光学频率梳谱线。

从图2可以看出，在 $\beta = 3$ 附近，0~4阶边带所

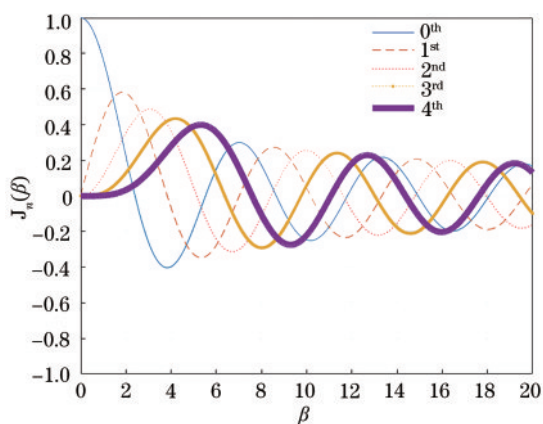


图2 不同调制系数下的贝塞尔曲线

Fig. 2 Bessel function curves under different modulation coefficients

对应的贝塞尔函数曲线值较为接近。在  $\beta=2.8, 2.9, 3.0, 3.1, 3.2$  处, 0~4 阶边带所对应的贝塞尔函数值如表 1 所示。

标准差公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{5}(x_{n'} - \bar{x})^2}, n' = 0, 1, 2, 3, 4, \quad (4)$$

表 1 不同调制系数下 0~4 阶边带对应的贝塞尔函数值

Table 1 Bessel functional values corresponding to 0<sup>th</sup>-4<sup>th</sup> order sidebands under different modulation coefficients

$\beta$	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3
0 <sup>th</sup>	-0.1850	-0.2243	-0.2601	-0.2921	-0.3202	-0.3443
1 <sup>st</sup>	0.4097	0.3754	0.3391	0.3009	0.2613	0.2207
2 <sup>nd</sup>	0.4777	0.4832	0.4861	0.4862	0.4835	0.4780
3 <sup>rd</sup>	0.2727	0.2911	0.3091	0.3264	0.3431	0.3588
4 <sup>th</sup>	0.1067	0.1190	0.1320	0.1456	0.1597	0.1743

$$\begin{cases} E_{1,+3} = E_0 J_3(\beta) \cos(\omega_1 t + 3\omega_e t) \\ E_{1,+4} = E_0 J_4(\beta) \cos(\omega_1 t + 4\omega_e t) \\ E_{1,+5} = -E_0 J_5(\beta) \cos(\omega_1 t + 5\omega_e t) \\ E_{2,-3} = E_0 J_3(\beta) \cos(\omega_2 t - 3\omega_e t) = E_0 J_3(\beta) \cos(\omega_1 t + 5\omega_e t) \\ E_{2,-4} = E_0 J_4(\beta) \cos(\omega_2 t - 4\omega_e t) = E_0 J_4(\beta) \cos(\omega_1 t + 4\omega_e t) \\ E_{2,-5} = -E_0 J_5(\beta) \cos(\omega_2 t - 5\omega_e t) = -E_0 J_5(\beta) \cos(\omega_1 t + 3\omega_e t) \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $E_{1,+3}, E_{1,+4}, E_{1,+5}$  为输入光 CW1 经调制产生的 +3、+4 与 +5 阶边带;  $E_{2,-3}, E_{2,-4}, E_{2,-5}$  为 CW2 经调制产生的 -3、-4 与 -5 阶边带。由 (5) 式可知, 连续光 CW1 的 +3、+5 阶分量与连续光 CW2 的 -5、-3 阶分量位于相同频率处, 而且双边带调

式中:  $x_{n'} (n' = 0, 1, 2, 3, 4)$  为不同调制系数对应的 0~4 阶边带值;  $\bar{x} = \frac{x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4}$ 。把表 1

中的数据代入 (4) 式中, 求得不同调制系数下对应的标准差  $\sigma$ 。计算结果如图 3 所示。

从图 3 可以清晰看出, 当  $\beta = 3$  时, 曲线处于凹陷处, 即这几个边带间的贝塞尔函数差值达到最小, 此时光学频率梳的平坦度在最佳状态。

根据设定的调制系数  $\beta = 3$ , 在 Bessel 函数曲线上选取对应的参数点, 如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 6 阶边带所对应的贝塞尔函数值接近于零, 因此可直接忽略。

根据 Bessel 函数曲线可知, 当  $\beta = 3$  时, 中心载波与调制产生的 1~3 阶边带间的贝塞尔函数幅度差值较小, 在平坦度所允许的范围, 此时调制器的输出是宽度为  $8\omega_e$  的光学频率梳。在调制系数选定的同时, 各阶边带所对应的 Bessel 函数值也确定了, 此时连续光 CW1 与 CW2 经过调制后生成的 5 阶边带功率较高, 因此 5 阶边带的存在会影响 3 阶边带的功率。由 (3) 式可得到

制方式的选定使得输出边带的相位固定, 因此无法利用相位消除 5 阶边带造成的影响, 此时 5 阶边带的功率累加在 3 阶边带上, 使其功率有所增加, 同一连续光调制产生的 +3、-3 阶边带的功率不再相等。

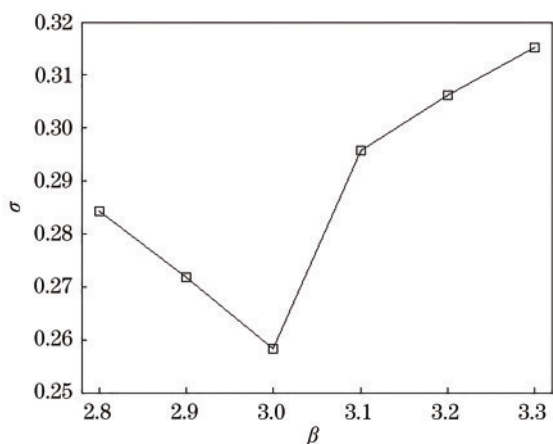


图 3 不同调制系数下各阶边带间的标准差

Fig. 3 Standard deviations between the sidebands of different orders under different modulation coefficients

在此系统中,平坦度由谱线间的最大功率差决定,不同激光器经调制后产生的 5 阶边带的功率累加导致 3 阶边带的功率发生变化,因此 5 阶边带对平坦度的影响可通过分析最大功率差而得到。

此时两路连续光的频率关系为  $\omega_2 = \omega_1 + 8\omega_c$ 。当两路连续光之间的频率差大于  $8\omega_c$  时, CW1 的 +6 阶边带与 CW2 的 -6 阶边带的抵消作用明显,输出幅值过低;当两路连续光之间的频率差小于  $8\omega_c$  时,由于高阶边带的影响,在 CW1 的 +3 阶和

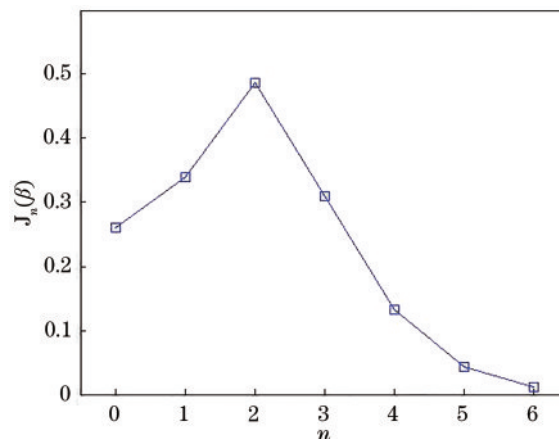


图 4  $n$  阶边带对应的 Bessel 函数曲线

Fig. 4 Bessel function curve of  $n$ -order sideband

CW2 的 -3 处产生同样的影响。两种情况下光学频率梳的平坦度均不够理想。经过调制后各阶边带的功率表达式为

$$P_{i,j} = |E_{i,j}|^2, i=1, 2 \text{ and } j=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \quad (6)$$

式中:  $E_{i,j}$  表示连续光 ( $i=1, 2$ ) 经过调制后输出的  $j$  阶边带的光强。选取连续光 CW1 经调制后输出的 0~±5 阶边带,将  $J_n(3)$  代入 (6) 式中,此时各阶边带的输出功率为

$$\begin{cases} P_{1,0} = 6.76 \exp(-2) |E_0|^2 \\ P_{1,+1} = P_{1,-1} = 9.53 \exp(-2) |E_0|^2 \\ P_{1,+2} = P_{1,-2} = 10.47 \exp(-2) |E_0|^2 \\ P_{1,+3} = 9.55 \exp(-2) |E_0|^2 - 0.19 \exp(-2) |E_0|^2 = 9.36 \exp(-2) |E_0|^2 \\ P_{1,+4} = P_{1,-4} = 3.74 \exp(-2) |E_0|^2 \\ P_{1,-3} = 9.55 \exp(-2) |E_0|^2 \\ P_{1,\pm 5} = 0.19 \exp(-2) |E_0|^2 \end{cases} \quad (7)$$

根据 (7) 式可以发现, 5 阶边带的存在使得 +3、-3 阶边带间存在一定的功率差。通过比较以上 11 条边带分量的功率, 可知连续光 CW1 经调制后输出的最大功率差由连续光 (中心边带) 与 +2 阶边带决定, 连续光 CW2 与连续光 CW1 的输入功率以及调制过程完全相同, 此时 5 阶边带的存在不会影响光学频率梳的平坦度。根据 (2) 式可知, 通过调整  $V_{RF}$  和  $V_\pi$  的值, 可改变各阶边带的贝塞尔函数值, 从而影响光学频率梳的平坦度。因此, 调制电

压需在合理范围内取值。

### 3 仿真结果与系统分析

利用 Optisystem 搭建数据信号在光学频率梳中的传输系统。输入端的两个连续光频率分别为 193.2 THz 与 193.6 THz, 功率为 20 dBm, 线宽为 0.01 MHz, 耦合之后输出的载波作为 MZM 的输入光信号。根据 (2) 式设置调制器的各项参数, 加载驱动调制信号, 频率都为 50 GHz, 相位差

为  $\pi$ , 选择  $V_{\pi} = 1.8 \text{ V}$ ,  $V_{\text{DC}} = 1.5 \text{ V}$ ,  $V_{\text{bias1}}$  和  $V_{\text{bias2}}$  分别为  $-4 \text{ V}$  和  $-2 \text{ V}$ , 每个连续光经双边带调制后输出原连续光以及其  $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$  阶边带, 共 15 个边带, 图 5 为系统输出的光学频率梳示意图。

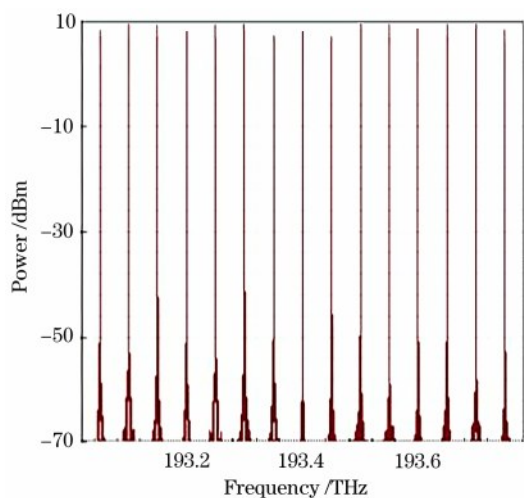


图 5 调制器输出的光学频率梳光谱图

Fig. 5 Output optical frequency comb spectrum of modulator

通过图 5 可以清晰观察到, 连续光 CW1 (193.2 THz) 经调制后产生的  $+3$  阶边带功率低于其  $-3$  阶边带功率。由理论分析可知, 这是由连续光 CW2 (193.6 THz) 的  $-5$  阶边带对  $+3$  阶边带的抵消作用所造成的。连续光 CW2 经调制产生的  $-3$  阶边带出现功率减小的情况也是相同原因。各边带最大功率为 10.47 dBm, 最低功率为 6.76 dBm。两个激光器之间的频率差、插入损耗差异及消光比差异等使得高阶边带互相影响, 激光器的频率漂移、MZM 直流偏置点的漂移使得两条连续光所产生的位于相同频率处的边带发生累加或抵消, 并会有一些重叠, 符合理论分析。此时平坦度为 3.7 dB, 有效光学频率梳的宽度为 700 GHz。

采用直接调制的方式将传输率为 5 Gbit/s 的不归零码加载到光学频率梳的谱线上, 经过背靠背 (B-T-B) 传输后, 截取连续光 CW1 的  $+3$  阶、CW2 的  $-3$  阶以及 CW1 的  $+4$  阶和 CW2 的  $-4$  阶合成边带进行解调, 得到的误码率 ( $B_E$ ) 曲线如图 6 中  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  所示。经过 80 km 光纤传输后, 截取连续光 CW1 的  $+3$  阶、CW2 的  $-3$  阶以及 CW1 的  $+4$  阶和 CW2 的  $-4$  阶合成边带进行解调, 对应的误码率曲线如图 6 中  $B_4$ 、 $B_5$ 、 $B_6$  所示。

通过对  $+3$ 、 $-3$  阶边带处的误码率进行对比可知, 未受影响的边带误码率相差不大, 受影响的边

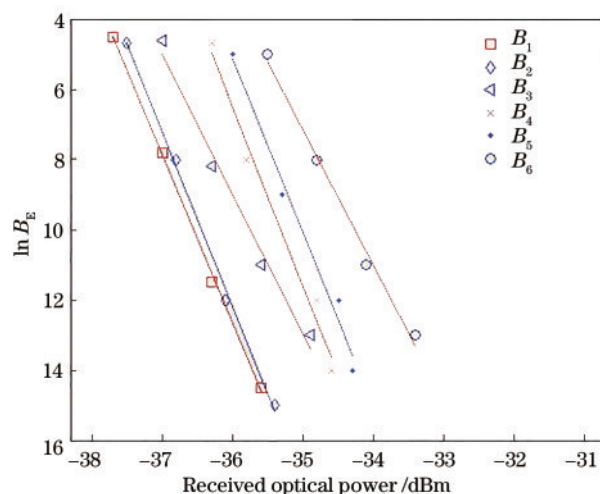


图 6 不同阶边带下解调得到的误码率曲线

Fig. 6 Bit error rate curves demodulated under different order sidebands

带误码率高于未受影响的边带; 经过 80 km 光纤传输后, 当误码率为  $10^{-9}$  量级时, 功率代价小于 1.8 dB。因此 5 阶边带的累加使得误码率有所增高。这几个分量在背靠背和 80 km 光纤传输后的眼图如图 7 所示。

由图 7(a) 和图 7(d)、图 7(b) 和图 7(e) 的两两对比可知, 在 5 阶边带影响下, 3 阶边带经接收解调后, 眼图的张开程度与被影响的 3 阶边带相差不大; 通过图 7(a) 和图 7(c)、图 7(b) 和图 7(c)、图 7(c) 和图 7(f) 的两两对比可看出, 经过 80 km 光纤传输后, 由于光纤的非线性作用, 连续光 CW1 的  $+4$  阶分量和 CW2 的  $-4$  阶分量的合成边带受高阶影响较大, 其接收解调的眼图有少许恶化, 其他阶边带分量的眼图依然清晰可见。根据以上结果可知, 5 阶边带的存在未对平坦度造成影响, 但会使误码率略微有所增加。

两个调制电压 (Modulation voltage 1 和 Modulation voltage 2) 分别控制马赫-曾德尔调制器上下臂的直流, 其对光梳平坦度的影响如图 8 所示。

由图 8 可知, 当两个调制电压分别取 3 V 与 4 V 时, 平坦度可达到最好。MZM 的结构较复杂, 可控变量更多, 且引入了直流偏置电压, 这意味着在实际应用中需要考虑由偏置信号引起的直流漂移现象。设置直流偏置是获得平坦光学频率梳的关键之一, 在保证系统稳定的条件下, 调节直流偏置电压同样也可以改善平坦度, 使得 OFC 质量最佳。

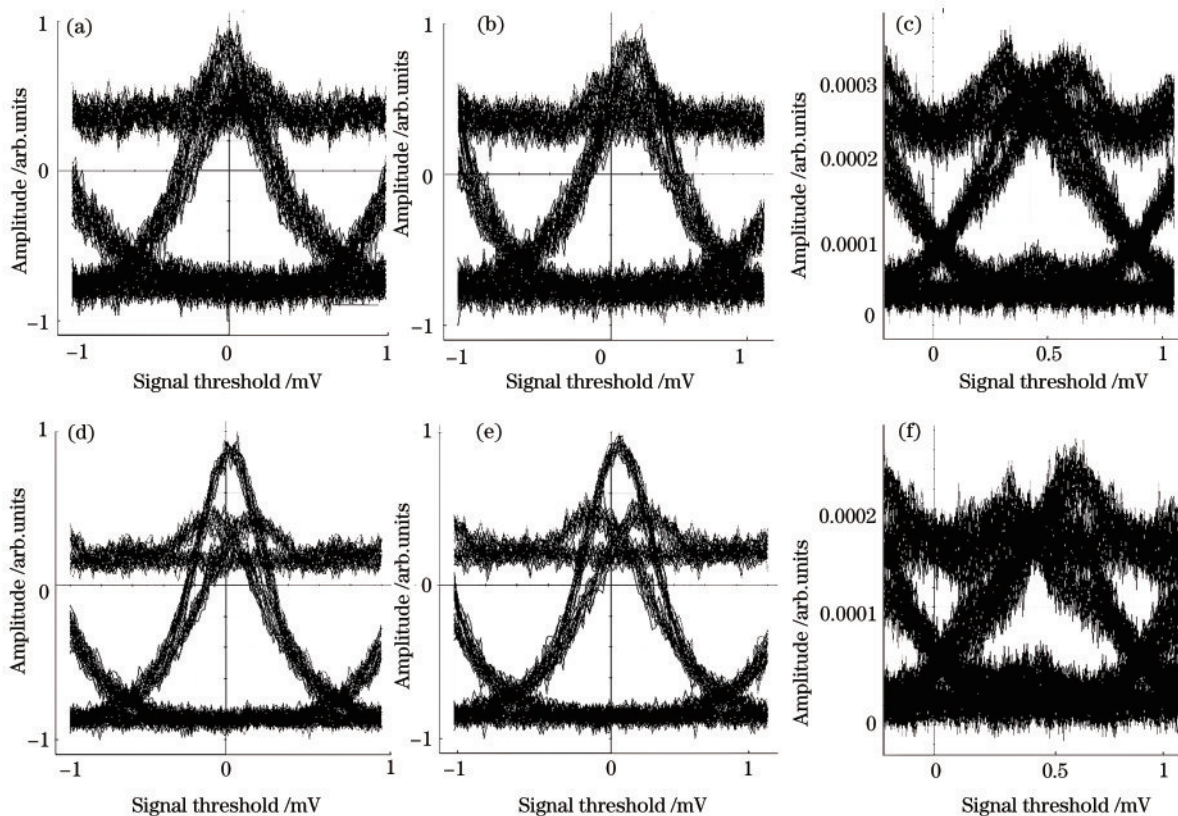


图 7 连续光不同阶分量的眼图及经光纤传输后在接收端解调得到的眼图。(a)连续光 CW1 的+3 阶分量;(b)连续光 CW2 的-3 阶分量;(c)合成边带分量;(d)经光纤传输后连续光 CW1 的+3 阶分量;(e)经光纤传输后连续光 CW2 的-3 阶分量;(f)经光纤传输后合成边带分量

Fig. 7 Eye diagrams of different order components of continuous wave and eye diagrams obtained by demodulation at receiving terminal after transmission through optical fiber. (a) Positive third-order component of CW1; (b) negative third-order component of CW2; (c) synthetic sideband component; (d) positive third-order component of CW1 after transmission through optical fiber; (e) negative third-order component of CW2 after transmission through optical fiber; (f) synthetic sideband component after transmission through optical fiber

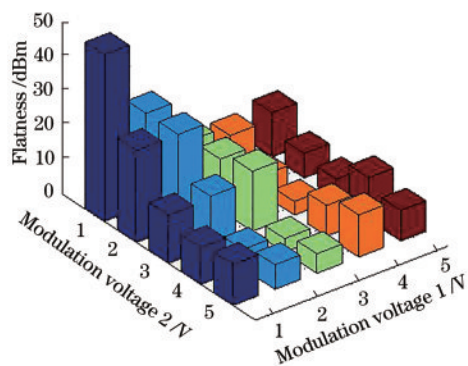


图 8 调制电压和平坦度的关系

Fig. 8 Relationship between modulation voltage and flatness

## 4 结 论

通过理论分析及模拟仿真,实现了基于两个激光器通过单个强度调制器产生宽光学频率梳系统

的方案。讨论了调制深度、高阶边带对系统的影响。随着调制深度的增大,高阶边带幅值对系统的影响不可忽略,根据贝塞尔函数曲线设定较小的调制深度。理论分析了 5 阶边带对各阶边带功率的抵消或累加作用,并利用该作用减小高阶边带的影响,生成了带宽为 700 GHz、平坦度为 3.7 dB 的宽光学频率梳。由系统仿真图可观察到,在双边带调制方式下,当加载有数据的无影响/受影响 3 阶谱线经 MZM 调制后,通过光纤传输,眼图效果相差不大,但后者的误码率略微增加,当误码率为  $10^{-9}$  时,功率代价小于 1.8 dB,从而突出了系统前端产生超平坦光学频率梳的必要性。通过理论分析,获得了合适的调制器关联变量-调制电压的关系,为产生平坦光学频率梳提供了另一种途径,对调制器的选择具有一定的指导意义。MZM 的稳定性往往会受到

直流偏置点漂移的影响,在之后的研究工作中,将提高生成光学频率梳的稳定性,并将其作为生成光谱性能的评价标准。

### 参 考 文 献

- [1] Wu X J, Li Y, Yu H Y, et al. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030001.  
吴学健, 李岩, 尉昊赞, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030001.
- [2] Pan R W. Research on optical fiber communication technology and optical fiber transmission system[J]. *Information & Communications*, 2017, 30(2): 258-259.  
潘日旺. 光纤通信技术与光纤传输系统研究[J]. *信息通信*, 2017, 30(2): 258-259.
- [3] Bai Z C. The characteristics and application prospect of optical fiber communication technology[J]. *China CIO News*, 2017(4): 138.  
白振成. 光纤通信技术的特点与应用研究展望[J]. *信息系统工程*, 2017(4): 138.
- [4] Das B, Mallick K, Mandal P, et al. Flat optical frequency comb generation employing cascaded dual-drive Mach-Zehnder modulators [J]. *Results in Physics*, 2020, 17: 103152.
- [5] Melo S A S, do Nascimento A R Jr, Cerqueira S A Jr, et al. Frequency comb expansion based on optical feedback, highly nonlinear and erbium-doped fibers[J]. *Optics Communications*, 2014, 312: 287-291.
- [6] Ullah R, Ullah S, Ali A, et al. Optical 1.56 Tbps coherent 4-QAM transmission across 60 km SSMF employing OFC scheme [J]. *AEU—International Journal of Electronics and Communications*, 2019, 105: 78-84.
- [7] Mallick K, Mukherjee R, Das B, et al. Bidirectional hybrid OFDM based wireless-over-fiber transport system using reflective semiconductor amplifier and polarization multiplexing technique[J]. *AEU—International Journal of Electronics and Communications*, 2018, 96: 260-266.
- [8] Mandal G C, Mukherjee R, Das B, et al. Bidirectional and simultaneous transmission of baseband and wireless signals over RSOA based WDM radio-over-fiber passive optical network using incoherent light injection technique [J]. *AEU—International Journal of Electronics and Communications*, 2017, 80: 193-198.
- [9] Melo S A S, Nascimento A R Jr, Cerqueira S A Jr, et al. Expanding frequency comb by means of enhanced multiple four-wave mixing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8964: 89641B.
- [10] Xiang J F, Wang L G, Ren W, et al. Frequency noise suppression of single-frequency laser with radio-frequency modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501009.  
项静峰, 王利国, 任伟, 等. 采用射频调制实现对单频激光器频率噪声的抑制[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501009.
- [11] Zhang F Z, Ge X Z, Pan S L, et al. A two-stage optical frequency comb generator based on polarization modulators and a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Communications*, 2015, 354: 94-102.
- [12] Liu H M, Pan W, Lu B, et al. Generation of flat optical frequency comb based on asynchronous RF-signal-driven cascaded phase modulators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1206002.  
刘昊明, 潘炜, 卢冰, 等. 基于异步射频信号驱动级联相位调制器产生平坦光学频率梳[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1206002.
- [13] Zhang X, Lin J C, Xi L X, et al. Generation of a 50-tone optical frequency comb with a tone-to-noise ratio larger than 37 dB[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(2): 116-119.
- [14] Huang X D, Lu J, Wang Y, et al. Influence of high-order sideband on high-frequency millimeter wave system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 040603.  
黄馨葭, 卢嘉, 王杨, 等. 高阶边带对高倍频光毫米波系统的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 040603.
- [15] Li X Y, Yu J J, Chang G K, et al. Frequency-quadrupling vector mm-wave signal generation by only one single-drive MZM [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(12): 1302-1305.
- [16] Zhu Z H, Zhao S H, Li Y J, et al. A novel scheme for high-quality 120 GHz optical millimeter-wave generation without optical filter [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 65: 29-35.
- [17] Wang Y L, Yang L H, Lin J R, et al. Absolute distance measurement based on coherent detection by femtosecond optical frequency comb [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0112003.  
王一霖, 杨凌辉, 林嘉睿, 等. 基于飞秒光学频率梳相关探测的绝对测距[J]. *光学学报*, 2019, 39(1):



- 0112003.
- [18] Xie H L, Jia K X, Chen J W, et al. Tunable optical frequency comb based on coupled radio frequency signal and single Mach-Zehnder modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0706002. 谢海伦, 贾可昕, 陈佳文, 等. 基于耦合射频信号和单个马赫-曾德尔调制器的可调光学频率梳[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0706002.
- [19] Yan P P, Gong H, Ye F, et al. All polarization-maintaining erbium-doped fiber based optical comb[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0115001. 鄢朋朋, 贡航, 叶飞, 等. 全保偏掺铒光纤光梳[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0115001.
- [20] Wang Q, Huo L, Xing Y F, et al. Ultra-flat optical frequency comb generator using a single-driven dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 3050-3053.
- [21] Kuse N, Jiang J, Lee C C, et al. All polarization-maintaining Er fiber-based optical frequency combs with nonlinear amplifying loop mirror [J]. Optics Express, 2016, 24(3): 3095-3102.
- [22] Arafin S, Simsek A, Kim S K, et al. Power-efficient Kerr frequency comb based tunable optical source[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-14.
- [23] Chen H Y, Ning T G, Li J, et al. Optical sinc-shaped nyquist pulses generation from frequency-quadrupled rectangular frequency comb [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1-7.
- [24] Dou Y J, Zhang H M, Yao M Y, et al. Generation of flat optical-frequency comb using cascaded intensity and phase modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(9): 727-729.
- [25] Zhang C, Ning T G, Li J, et al. A full-duplex WDM-RoF system based on tunable optical frequency comb generator [J]. Optics Communications, 2015, 344: 65-70.