

激光与光电子学进展

高平坦可调谐电光频梳设计与分析

张维, 赵峰*, 乔聪, 刘安迪, 闫特刚, 崔悦, 刘明星

西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121

摘要 提出一种高平坦宽带光学频率梳(OFC)信号产生方案,对高平坦、宽带电光频梳信号产生机理与方法开展了理论与仿真分析。在仿真分析中,利用双驱动马赫-曾德尔调制器产生光频梳信号,利用相位调制器进一步提升梳状线的数量,最后通过联合优化马赫-曾德尔调制器的驱动信号功率和直流偏置电压来提高平坦度。仿真结果显示,该方案可产生带宽为 1.08 THz 的宽带光频梳信号,音噪比(TNR)达到 60 dB、平坦度达到 0.5 dB。将所提方案应用于光载太赫兹通信系统,通过仿真验证了单通道及多通道 16 阶正交幅度调制(16QAM)太赫兹信号在背对背(BTB)或 10 km 光纤传输情况下的传输性能。结果表明,上述每种情况下的误码率都低于前向纠错码的阈值。

关键词 光频梳; 马赫-曾德尔调制器; 相位调制器

中图分类号 TN928

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230750

Design and Analysis of a High Flat Tunable Terahertz Electro-Optical Frequency Comb

Zhang Wei, Zhao Feng*, Qiao Cong, Liu Andi, Yan Tegang, Cui Yue, Liu Mingxing

*School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121,
Shaanxi, China*

Abstract A high-flat broadband optical frequency comb (OFC) signal generation scheme is proposed, and the mechanism and simulation analysis of the signal generation mechanism and method of high-flat and wideband electro-optical comb are carried out. In the simulation analysis, the dual-drive Mach-Zehnder modulator is used to generate the optical frequency comb signal, the phase modulator is used to further increase the number of comb lines, and finally the flatness is improved by jointly optimizing the drive signal power and DC bias voltage of the Mach-Zehnder modulator. The simulation results show that the scheme can generate a broadband comb signal with a bandwidth of 1.08 THz, with a tone-to-noise ratio of 60 dB and a flatness of 0.5 dB. The proposed scheme is applied to the optical carrier terahertz communication system, and the transmission performance of single-channel and multi-channel 16th-order quadrature amplitude modulation (16QAM) terahertz signals in the case of back-to-back (BTB) or 10 km optical fiber transmission is verified by simulation. The results show that the bit error rate in each of the above cases is lower than the threshold of forward error correction code.

Key words optical frequency comb; Mach-Zehnder modulator; Phase modulators

1 引言

随着 5G 技术的应用推广,智能终端和新兴应用催生了 Tbit/s 通信速率的需求^[1-5]。太赫兹可支持超高速率的无线通信,基于微波光子的太赫兹通信技术能够克服太赫兹系统的电子瓶颈,具备超宽带、低时延的通信传输特点,成为了 6G 极具潜力的候选技术^[1-6]。

在光载太赫兹信号产生、传输和检测过程中,使用

光子外差拍频和相干远程外差检测的太赫兹通信技术具有许多优点,例如更高的链路增益和载噪比以及更低的色散灵敏度。但是,要求用于光外差拍频的两个光源必须稳定,激光器受外部震动、温度变化、散热条件等因素影响会产生频率漂移,导致信号光和本振光频率的差值不稳定,由此信号光和本振光外差拍频产生的太赫兹信号的稳定性很差,需要复杂的后续数字信号处理算法进行补偿。光频梳具有超高频率稳定性

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-04-04; 录用日期: 2023-04-27; 网络首发日期: 2023-05-07

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2023-JC-JQ-58)、陕西省创新能力支撑计划(2021TD-09)

通信作者: *hfengzhao@xupt.edu.cn

和超低相位噪声,在精密光谱测量、成像、通信等领域具有重要应用^[7-12]。

近年来,已经报道了多种用于生成光频梳的方法^[12-20]:如锁模激光器(MLL)、循环频移(RFS)环路、克尔微腔^[13-18]、电光调制等。基于 MLL 生成的光频梳具有较高的带宽,但需要复杂的反馈回路来确保稳定运行,而且频率间隔难以调谐。基于 RFS 的环路灵活性高,易于生成大量梳状线,但是 RFS 回路结构很复杂,需要更多的组件且存在产生的光频梳幅度差较大、相位关系不明显的缺点。例如,在文献^[16]中,双 RFS 环路遵循复杂的结构,生成的梳状线不稳定,难以维护,且从生成的频谱中可以看到,梳状线间的最大功率偏差超过 10 dB。使用光学微腔同样可以产生光频梳^[17],克尔微腔产生的光频梳具有脉冲重复频率高^[18]、相干性好、可片上集成等优点,但是克尔光梳形成机理比较复杂^[19-21],需要精细的频率调谐手段才能达到孤子态,且梳齿间隔受制于微腔的结构,难以有效调谐。基于电光调制器产生光频梳信号具有体积小、梳齿间隔可调谐等优点^[22-28],在光频梳生成方案中引起了极大的关注。近年来的研究表明:将电光调制器级联可产生梳状线间隔可调、超宽带的光频梳信

号,能够满足光频梳的应用需求。

本文提出一种基于双驱动马赫-曾德尔(DD-MZM)、相位调制器(PM)和马赫-曾德尔调制器(MZM)的高平坦宽带光频梳产生方案。与现有的其他技术方案相比,所提方案的光频梳信号可调谐、带宽大、平坦度高。将所提方案应用于光载太赫兹通信系统,利用 VPI 和 MATLAB 软件对其性能进行联合仿真分析,主要分析了单通道及多通道 16 阶正交幅度调制(16QAM)太赫兹信号在背对背(BTB)或 10 km 光纤传输情况下的传输性能。

2 理论分析

基于电光调制器的高平坦宽带光学频率梳发生器的系统结构如图 1 所示,连续波(CW)激光器产生的光波信号入射到 DD-MZM 中调制,DD-MZM 的双臂由具有特定幅度差的同频同相微波信号驱动,通过调节 DD-MZM 两臂驱动信号之间的幅值差和直流偏置电压差,可以实现平坦的光频梳输出。DD-MZM 的输出光信号注入 PM 用于增加梳状线的数量、MZM 用于优化平坦度。下面简要对该方案的理论进行分析。

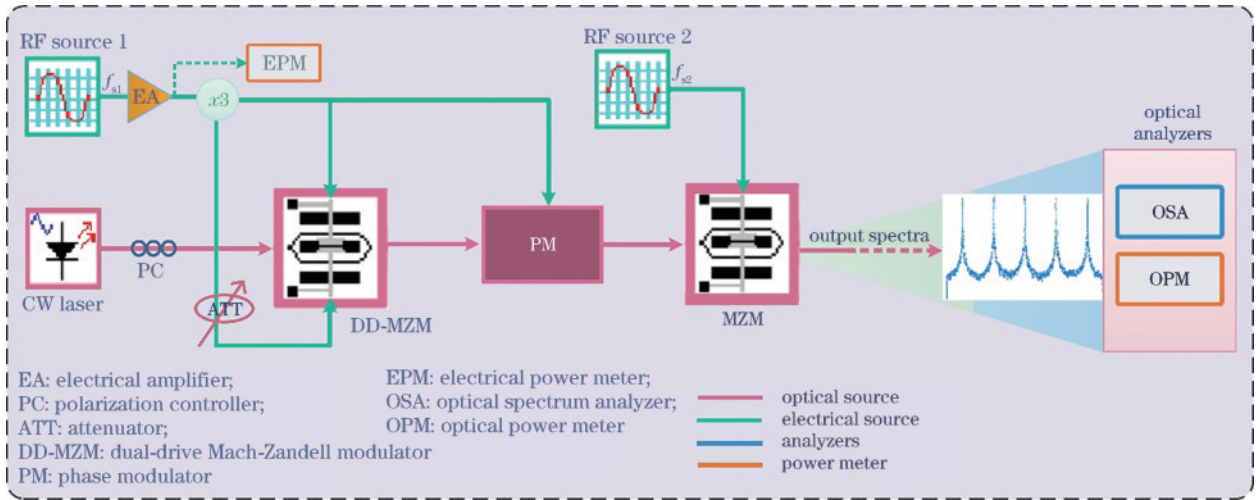


图 1 基于电光调制器的高平坦太赫兹宽带光频梳发生器系统结构图

Fig. 1 High-flat terahertz broadband optical frequency comb generator system structure diagram based on electro-optical modulator

连续波激光器产生幅值为 E_{in} 的光波 $E_{CW} = E_{in} \exp(j\omega_0 t)$ 入射到 DD-MZM 中:其中,注入光波的偏振方向经偏振控制器调整,使之与 DD-MZM 的偏振方向一致;调制频率为 ω 的射频源信号 f_{s1} 经过电放大器后在不影响信号频率、相位或驱动电压的情况下被 1×3 的功分器分为 3 路输出,第 1 路信号 f_{RFa} 直接驱动双驱动马赫-曾德尔的上臂,第 2 路信号 f_{RFb} 经衰减器后驱动双驱动马赫-曾德尔的下臂,通过调节衰减器的偏移量来控制调制器上下臂微波驱动信号幅度差。通过调节上下臂两个直流源电压来控制直流偏压差。 f_{RFa} 及 f_{RFb} 的振幅分别为 A_1 及 A_2 ,其表达式分别为

$$\begin{cases} f_{RFa} = A_1 \sin \omega t \\ f_{RFb} = A_2 \sin \omega t \end{cases} \quad (1)$$

DD-MZM 输出的光信号 E_{out} 的表达式为

$$E_{out} = \frac{E_{CW}}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} [J_k(\beta_1) \exp(jk\omega t + \theta_1) + J_k(\beta_2) \exp(jk\omega t + \theta_2)], \quad (2)$$

式中: β_1 和 β_2 表示调制器上下臂的调制系数; J_k 表示第 k 阶贝塞尔函数; θ_1, θ_2 表示上下臂的光学相位延迟;对于大振幅的驱动信号 A_i ,贝塞尔函数可以渐近近似为

$$J_k(A_i) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi}} A_i^{-\frac{1}{2}} \cos \left[A_i - \frac{(2k+1)\pi}{4} \right]. \quad (3)$$

接下来,将转换效率 η_k 定义成 k 阶光频梳成分的强度 P_k 与输入光强 P_{in} 比值。当驱动振幅为较大振幅信号,即 A_1 和 A_2 较大时,梳状线的功率转换效率 η_k 可以近似按照式(4)展开。

$$\eta_k = \frac{P_k}{P_{in}} = \frac{1}{2\pi A} \times \left[1 + \cos(2\Delta\theta)\cos(2\Delta A) + \left\{ \cos(2\Delta\theta)\cos(2\Delta A) \right\} \cos\left(2\bar{A} - \frac{2k\pi + 1}{2}\right) \right], \quad (4)$$

式中: $\bar{A} = (A_1 + A_2)/2$; $\Delta A = (A_1 - A_2)/2$; $\Delta\theta = (\theta_1 - \theta_2)/2$ 。

可以看出,得到平坦的谱线特性的条件是 η_k 与 k 无关,因此,由此得到平坦的谱线特性的条件可以导出式(5)。

$$\Delta A + \Delta\theta = \pi/2. \quad (5)$$

如果既要满足平坦化条件,又要以最大的效率产生光学频率梳,就得满足最大效率平坦化条件:

$$E_{PM-out} = E_{PM-in}(t) \sum_n J_n(\beta_3) \exp(jn\omega t) = \frac{1}{2} \sum_l \left\{ \sum_k J_{l-k}(A_3) \left[J_k(A_1) \exp(-j\Delta\theta) + J_k(A_2) \exp(j\Delta\theta) \right] \right\} \exp(jl\omega t), \quad (7)$$

式中: β_3 表示相位调制器的调制系数,且将DD-MZM的输出当作光源进行调制,从而产生27线平坦光梳。

将相位调制器的输出信号作为输入源送入马赫-曾德尔调制器再次调制,射频信号源2驱动马赫-曾德尔调制器,控制驱动信号功率和直流偏置电压,使得级联DD-MZM和PM产生的梳状光谱的低阶次的光边带功率增大,原来由于功率太大导致的蝙蝠耳朵形状的高阶次光边带的功率减小,梳状光谱的功率平坦度降低,最终得到梳齿数目多且平坦度为0.5 dB的光频梳。利用光功率计(OPM)、光谱分析仪(OSA)进行测量和可视化。利用光学仿真软件VPI来仿真和分析所提方案的性能。DDMZM的参数值和布局参数在表1中给出。

表1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

Parameter	Value
Layout Parameter	
Bit rate /(bit/s)	10
Samples per bit	128
Sample rate /(10 ⁹ Hz)	1280
DD-LiNbO ₃ -MZM	
Extinction ratio /dB	20
Switching bias voltage /V	2.5
Insertion loss /dB	7

$$\Delta A = \Delta\theta = \pi/4. \quad (6)$$

最终所述DD-MZM输出11根平坦度为1.1 dB、19根平坦度在4.5 dB之内的光学频率梳,边带间隔为 f 。利用DD-MZM产生光频梳的结构如图2所示。

功分器的第3路信号在经过电放大器放大后驱动相位调制器,输出的光信号为

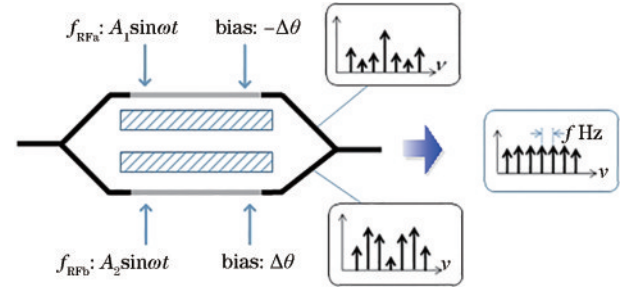


图2 双驱动马赫-曾德尔调制器产生光频梳结构图

Fig. 2 Structure diagram of optical frequency comb generated by dual-drive Mach-Zender modulator

3 结果与讨论

3.1 光学频率梳

基于电光调制器的高平坦宽带光频梳产生装置及理论对所提方案进行仿真研究。激光源(Agilent N7714A)最大输出光功率设置为10 dBm、光频率为193.4 THz(波长为1550 nm)、线宽约为100 kHz。DDMZM的仿真参数和商用调制器Fujitsu FTM7937参数设置一样,驱动信号端的半波电压 $V_{\pi RF}$ 和直流偏置电压端的半波电压 $V_{\pi DC}$ 分别设置为1.6 V、5 V。为了驱动DDMZM,使用20 GHz射频信号源,并使用射频放大器(OA4VM3,饱和功率为20 dBm),通过仔细调整DDMZM的驱动电压和偏置电压,产生19根稳定的载波,具有高信噪比(TNR)和中心载波之间几乎平坦的频谱。输出的光频梳输出光谱如图3(a)所示,通过一个PM调制器,增加梳状线的数量,如图3(b)所示。可以看出,结果不够平坦,梳状线之间的功率偏差(PD)高达4 dB~6 dB。所以在PM的输出端口,使用MZM来进一步生成稳定的光谱并使梳线的平坦度降低。输出如图3(c)所示,平坦度被降低到最大0.5 dB。表2给出了功率差异,其中,还显示了每个调制器生成的载波数量。

从图4(a)可以观察到,调制器下臂衰减器的衰减设置值为1 dB时,平坦度最好,随着衰减值偏移量的增加,平坦度变差。此时,上下臂微波驱动信号电压的幅度为6.0 V、5.34 V,相应地, $V_{\pi RF}$ 的归一化幅度差

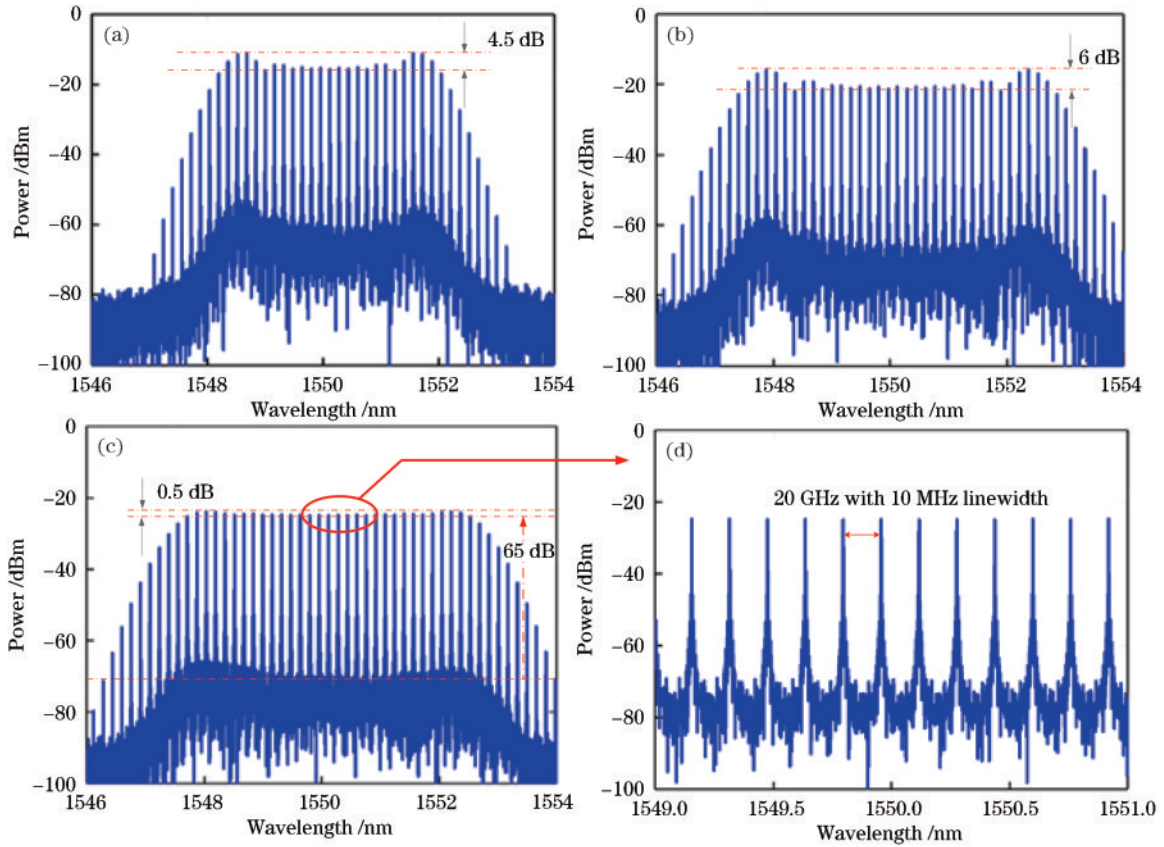


图3 所提 OFC 方案的仿真结果。(a)DDMZM 输出光谱;(b)PM 输出光谱;(c)MZM 输出光谱;(d)MZM 输出局部放大光谱
Fig. 3 The simulation results of the proposed OFC scheme. (a) Output spectrum of DDMZM; (b) output spectrum of PM; (c) output spectrum of MZM; (d) localized amplification spectrum of MZM output

表2 调制器之间的最高和最低功率差
Table 2 Highest and lowest power differences between modulators

Source	Number of Comb lines	Lowest PD / dB	Highest PD / dB
DDMZM	11	0-0.3	3-4.5
PM	27	0-2	4-5.3
MZM	27	0-0.2	0.3-0.5

$\Delta A = 0.2\pi$,通过调整调制器上下臂之间的直流偏压差,通过光谱分析仪测量输出的光频梳,得到平坦度,结果如图4(b)所示。

从图4(b)可以观察到,当直流偏压差从2.6 V调整到3.0 V时,光频梳的平坦度逐渐变好,然后随着直流偏压超过3 V,平坦度迅速变差。因此当直流偏压差设置为3.0 V时,光频梳的性能最好,此时上下臂的直流偏压差与 $V_{\pi DC}$ 的归一化相位差 0.3π 相对应,符合光频梳平坦化条件 $\Delta A + \Delta\theta = \pi/2$,和理论分析结果一致。仿真输出光谱图如图5所示。

接下来仿真 $\Delta A = \Delta\theta = \pi/4$ 最大转换效率下光频梳的平坦度,将调制器下臂衰减器的衰减偏移量变为1.25 dB,即下臂的驱动电压幅度变为5.2 V,此时, $V_{\pi RF}$ 的归一化幅度差 $\Delta A = \pi/4$ 。直流偏压差变为2.5 V,所对应的 $V_{\pi DC}$ 归一化相位差 $\Delta\theta = \pi/4$,此外,

在最大转换效率点下改变调制器上下臂之间的驱动幅度差和直流偏压差,对理论推导出的光频梳平坦条件进行验证,得到的仿真结果如图4(c)、(d)所示。

图4(c)中,调制器两臂之间的驱动信号幅度差 $\Delta A = \pi/4$ 保持不变,调节直流偏压差;图4(d)中,调制器两臂之间直流偏压差 $\Delta A = \pi/4$ 保持不变,调节驱动信号幅度差。可以观察到,在满足最大效率平坦化条件 $\Delta A = \Delta\theta = \pi/4$ 时,可以得到最平坦的光频梳输出光谱图,结果与理论推导一致,从而证实了理论推导的准确性。然后,在保持光频梳平坦条件下,研究频率间隔变化对生成光频梳性能的影响。设置频率间隔分别为20 GHz、30 GHz、40 GHz,仿真结果如图6所示。

在图6中,随着频率间隔的增加,平坦度变化不明显,在0.1 dB范围内。音噪比为所产生的光频梳的各音调的输出功率与噪声功率的差值,并未产生较大的波动。可以看出,频率间隔的变化对 OFC 的性能影响很小。即采用该方案生成的光频梳可以灵活实现输出频率间隔的调谐。图7表示光梳数与载波之间最小和最大功率偏差的曲线,可以观察到,调制器的性能随着调制器数量的增加而显著提高。即通过合理的参数设计可以在梳状线数量增加的同时使其平坦度变好。

以上分析和结果是基于 MZM 的直流偏置电压处

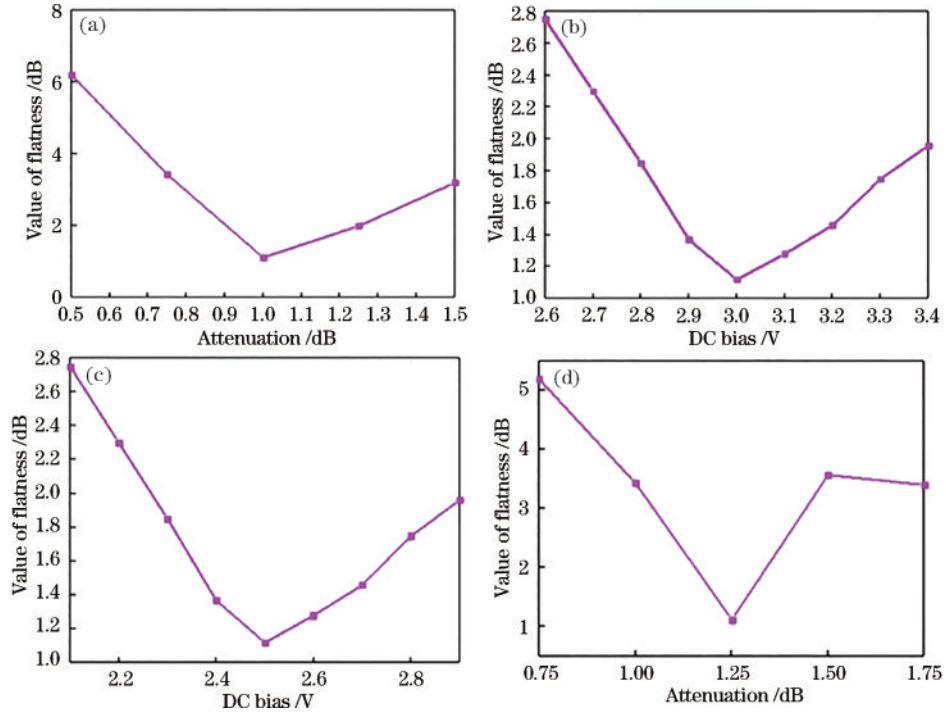


图 4 不同转换效率时驱动信号幅度差、直流偏压差对光梳平坦度的影响。(a) 衰减器对光梳平坦度的影响;(b) 直流偏压差对光梳平坦度的影响;(c) $\Delta A = \pi/4$ 时,直流偏压差对光梳平坦度的影响;(d) $\Delta A = \pi/4$ 时,驱动信号幅度差对光梳平坦度的影响

Fig. 4 The influence of driving signal amplitude difference and DC bias voltage difference on the flatness of the optical comb under different conversion efficiencies. (a) The influence of attenuators on the flatness of optical combs; (b) the influence of DC bias voltage difference on the flatness of optical combs; (c) the influence of DC bias voltage difference on the flatness of the optical comb when $\Delta A = \pi/4$; (d) the influence of the amplitude difference of the driving signal on the flatness of the optical comb when $\Delta A = \pi/4$

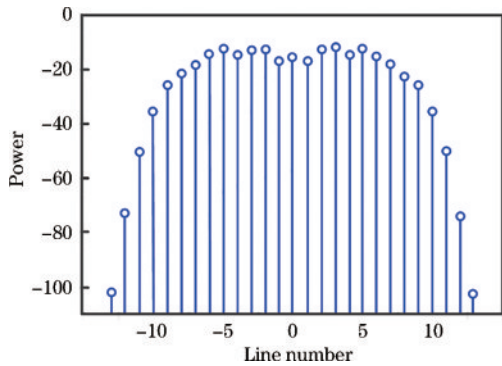


图 5 $\Delta A = 0.2\pi, \Delta\theta = 0.3\pi$ 时输出光谱图

Fig. 5 Output spectra when $\Delta A = 0.2\pi, \Delta\theta = 0.3\pi$

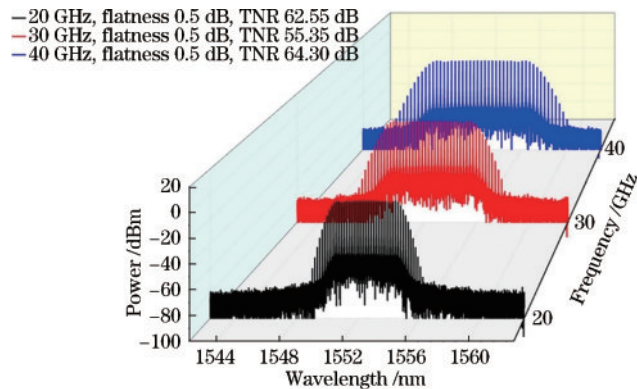


图 6 不同微波驱动信号频率下的输出光谱图

Fig. 6 Output spectra at different microwave drive signal frequencies

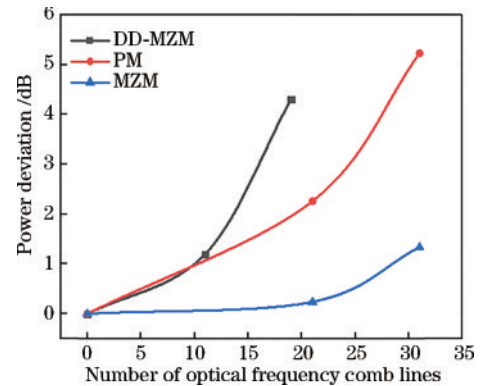


图 7 光梳数与不同功率偏差的曲线

Fig. 7 Curves of the number of combs versus different power deviations

于正确值的理想情况。事实上,在实际情况下,直流偏置电压可能会偏离理想值。因此有必要分析偏置电压漂移对 OFC 性能的影响。以频率间隔为 20 GHz 的 OFC 为例,将直流偏置电压偏差的值从 -5% 调整为 5% 。其他变量值保持不变,仿真结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,随着直流电压偏移量的增加,平坦度值略有增加,但不超过 0.6 dB。总体而言,变化并不明显,对梳状光谱的影响较小,这表明所提 OFC 方案具有良好的性能。

上述仿真验证了所提方案对 DD-MZM 驱动信号

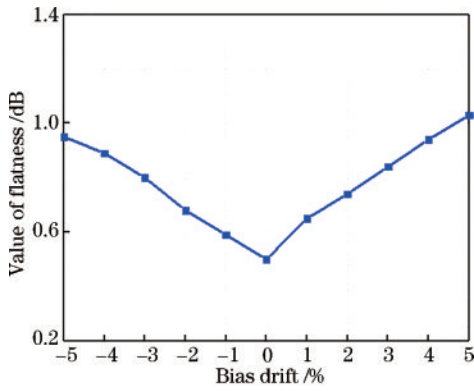


图8 MZM 偏置漂移对 OFC 平坦度的影响

Fig. 8 Effect of MZM bias drift on OFC flatness

幅度和直流偏压差的要求以及微波频率间隔的可调性和 MZM 偏置漂移对 OFC 平坦的影响。从仿真结果可以看出,所提方案具有较强可实现性。另外,方案中没有考虑到微波信号工作稳定性和非理想相位偏移对方案的影响,实际环境中这些因素可能会影响光频梳的稳定性。

3.2 传输系统

基于光学频率梳的光载太赫兹传输系统仿真结构如图 9(a)所示。产生的光学频率梳示意图如图 9(c)所示, OFC 被掺铒光纤放大器(EDFA-1)放大后,装置中 WSS-1 用来从(f)点的 OFC 选择性地滤出两组频率梳

分量,作为两路光输出,其中,一路作为光本振,另一路是多通道的光载波,两组分量之间的频率间隔是 380~440 GHz,也就是后面光域混频产生的多通道 THz 信号的频率范围。在光载波的一路,一组选出的功率平衡 OFC 分量进入一个同相/正交调制器。发射机的离线数字信号处理(DSP)如图 9(b)所示。由 MATLAB 产生的 8 Gbaud 的 16-QAM 基带信号经过一组线性放大器之后调制到 IQ 调制器上去完成基带调制。调制器出来的光信号经过 EDFA-2 的放大之后,这组调制的光载波分量被 WSS-2 选择性地按照奇通道和偶通道分成两路输出。把一段光纤插入其中一路,用来做相邻通道间的去相干,然后两路奇偶通道再通过光耦合器耦合在一起。然后把光本振和调制之后的光载波耦合在一起,用 EDFA-3 对其进行增益放大,并利用普通单模光纤(SSMF)进行传输。在接收端,光本振和一组调制的光载波分量要在 UTC-PD 里面完成光域混频,转化成分布在 380~440 GHz 频段内的、频率间隔为 20 GHz 的多通道 THz 信号,如图 9(d)所示。在 UTC-PD 之前用一个可变光衰减器(VOA)来精准控制入射光的功率。最后,如图 9(e)所示,可以通过离线 DSP 算法从 0.4 THz RF 信号中恢复发射机数据,包括频率下变频、色散补偿、QPSK 的恒模算法(CMA)均衡和 16 QAM 的级联多模算法(CMMA)均衡、频偏估计(FOE)、相位估计和误码率(BER)计算。

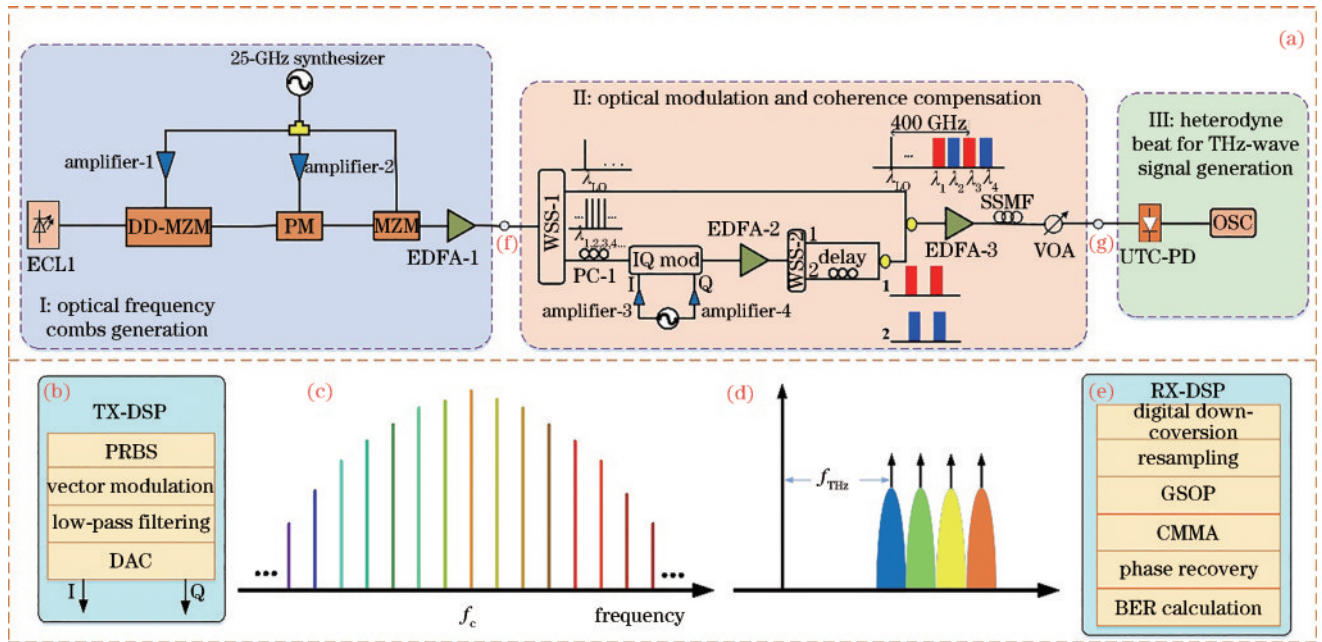


图9 基于光学频率梳的光载太赫兹传输系统

Fig. 9 Optical carrier terahertz transmission system based on optical frequency comb

为了探索此方案对于 16QAM 信号的传输能力,先进行了单通道载波为 400 GHz 的传输。根据仿真结果,计算了在 BTB 传输和 10 km SSMF 传输 0.4 THz 16QAM 光太赫兹波矢量信号曲线的发射光功率,如图 10 所示。可以发现,在每种情况下,误码率都随着

发射光功率的增加而减小。在 BTB 中传输时,发射到 UTC-PD 的光功率约为 -10.8 dBm,当 HD-FEC 阈值为 3.8×10^{-3} 时,在 10 km SSMF 传输情况下,接收光功率约为 -7.8 dBm。在 10 km 光传输的情况下,EDFA-3 的增益要比 BTB 时大一些,以保证能够补偿

10 km 光纤传输带来的额外功率损耗。图(10)插图为接收光功率为 -10.8 dBm/ -7.8 dBm 时,通过离线 DSP 在 BTB 情况下/10 km SSMF 传输情况下 0.4 THz 波矢量 16QAM 信号星座图。由于光纤色散的影响, BTB 情况下的星座图比 10 km SSMF-28 传输情况下的星座图清晰得多。

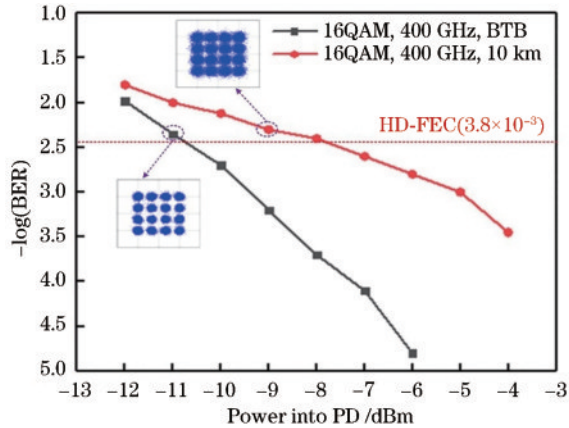


图 10 单通道 16QAM 信号 BER 与 PD 输入光功率的关系曲线
Fig. 10 Relationship curve between BER and PD input optical power of a single-channel 16QAM signal

接下来,进行了 4 通道的 THz 传输仿真。THz 的载波分别为 380 GHz、400 GHz、420 GHz、440 GHz。也就是说,在用 WSS-1 进行 OFC 分量选择的时候,使得 4 条光载波分量和 1 条光本振分量的频率间隔是 380~440 GHz。在 IQ 调制器上对 4 条载波同时调制上 8 Gbaud 的 16QAM 信号,拍频后经过 10 km 光纤传输。所有信道的误码性能测量结果如图 11 所示。另外还展示了误码率为 2.3×10^{-2} 和 1×10^{-4} 的两个星座图。可以看到,所有信道的误码率性能都低于 HD-FEC 阈值 (3.8×10^{-3} , 开销为 7%)。最佳信道和最差信道之间的功率损失约为 1 dB。

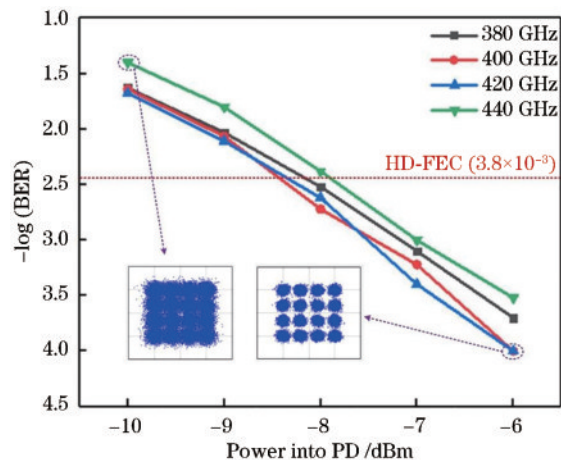


图 11 多通道 16QAM 信号 BER 与 PD 输入光功率的关系曲线
Fig. 11 Relationship curve between BER and PD input optical power of multi-channel 16QAM signal

4 结 论

提出一种高平坦宽带光学频率梳产生方案,该方案基于双驱动马赫-曾德尔调制器生成宽光梳,用相位调制器增加梳状线的数量,通过调整施加到马赫-曾德尔调制器的微波信号功率和直流偏置来优化平坦度,可以生成 27 线光频梳信号,平坦度为 0.5 dB。该方案相对简单且可调节,其中,频率间隔随着应用于调制器的微波频率而变化。分析了基于光频梳发生器的太赫兹信号产生与传输方案。并通过仿真分析,分别验证了单通道以及多通道的 8 Gbaud 16QAM 太赫兹信号在背对背或 10 km 光纤传输情况下的传输性能。结果表明,上述每种情况下的误码率都低于前向纠错码的阈值。即在目前的技术条件下,使用光频梳发生器产生太赫兹信号是一种经济实用的方案。

参 考 文 献

- [1] Rappaport T S, Xing Y C, Kanhere O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. IEEE Access, 2019, 7: 78729-78757.
- [2] Song H J, Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 256-263.
- [3] Shi J Z, Zhang F Z, Zhou Y W, et al. Photonic scanning receiver for wide-range microwave frequency measurement by photonic frequency octupling and in-phase and quadrature mixing[J]. Optics Letters, 2020, 45(19): 5381-5384.
- [4] Li X Y, Yu J J, Zhao L, et al. 1-Tb/s millimeter-wave signal wireless delivery at D-band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(1): 196-204.
- [5] Chun B J, Hyun S, Kim S, et al. Frequency-comb-referenced multi-channel fiber laser for DWDM communication[J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29179-29185.
- [6] Chen C, Zhang C F, Zhang W, et al. Scalable and reconfigurable generation of flat optical comb for WDM-based next-generation broadband optical access networks [J]. Optics Communications, 2014, 321: 16-22.
- [7] Shams H, Fice M J, Balakier K, et al. Photonic generation for multichannel THz wireless communication [J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23465-23472.
- [8] Li X Y, Yu J J, Wang K H, et al. 120 Gb/s wireless terahertz-wave signal delivery by 375 GHz-500 GHz multi-carrier in a 2×2 MIMO system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 606-611.
- [9] Soto M A, Alem M, Amin Shoaie M, et al. Optical sinc-shaped Nyquist pulses of exceptional quality[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2898.
- [10] Zhang F Z, 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] Zhou X, Zheng X P, Wen H, et al. All optical arbitrary

- waveform generation by optical frequency comb based on cascading intensity modulation[J]. Optics Communications, 2011, 284(15): 3706-3710.
- [12] Li B, Lin G B, Wu F P, et al. Generation of optical frequency comb with large spectral lines by cascaded dual-parallel modulator and intensity modulators[J]. Optik, 2016, 127(18): 7174-7179.
- [13] Pelusi M, Tan H N, Solis-Trapala K, et al. Low noise frequency combs for higher order QAM formats through cross-phase modulation of modelocked laser pulses[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1101612.
- [14] Fukuchi Y, Hirata K, Ikeoka H. Wavelength-tunable and bandwidth-variable ultra-flat optical frequency comb block generation from a bismuth-based actively mode-locked fiber laser[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(1): 1500209.
- [15] Jiang W, Zhao S H, Li X J, et al. Optical frequency comb generation based on three parallel Mach-Zehnder modulators with recirculating frequency shifting loop[J]. Optical Review, 2017, 24(4): 533-539.
- [16] Li J P, Ma H T, Li Z H, et al. Optical frequency comb generation based on dual-polarization IQ modulator shared by two polarization-orthogonal recirculating frequency shifting loops[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 7906110.
- [17] Herr T, Brasch V, Jost J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators[J]. Nature Photonics, 2014, 8(2): 145-152.
- [18] Brasch V, Geiselmann M, Herr T, et al. Photonic chip-based optical frequency comb using soliton Cherenkov radiation[J]. Science, 2016, 351(6271): 357-360.
- [19] Cole D C, Lamb E S, Del'Haye P, et al. Soliton crystals in Kerr resonators[J]. Nature Photonics, 2017, 11(10): 671-676.
- [20] Godey C, Balakireva I V, Coillet A, et al. Stability analysis of the spatiotemporal Lugiato-Lefever model for Kerr optical frequency combs in the anomalous and normal dispersion regimes[J]. Physical Review A, 2014, 89(6): 063814.
- [21] Wang W Q, Wang L R, Zhang W F. Advances in soliton microcomb generation[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(3): 034001.
- [22] Morohashi I, Sakamoto T, Sekine N, et al. Ultrashort optical pulse source using Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator[J]. Nano Communication Networks, 2016, 10: 79-84.
- [23] Qu K, Zhao S H, Li X, et al. Ultra-flat and broadband optical frequency comb generator via a single Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(2): 255-258.
- [24] 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.
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.
- [25] 高军萍, 赵盟盟, 卢嘉, 等. 基于单个强度调制器产生宽光学频率梳系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0913001.
Gao J P, Zhao M M, Lu J, et al. Wide optical frequency comb system based on single intensity modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0913001.
- [26] 孔萌, 陆彦婷, 林栋, 等. 参考光学频率梳的数字激光稳频技术[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1614001.
Kong M, Lu Y T, Lin D, et al. Digital laser frequency stabilization with reference to an optical frequency comb[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1614001.
- [27] Wu R, Supradeepa V R, Long C M, et al. Generation of very flat optical frequency combs from continuous-wave lasers using cascaded intensity and phase modulators driven by tailored radio frequency waveforms[J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3234-3236.
- [28] He C, Pan S L, Guo R H, et al. Ultraflat optical frequency comb generated based on cascaded polarization modulators[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3834-3836.