

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250265.

专题:纪念创刊50周年

潘云龙,卢芝蓝,周盈君,等. 基于高频混合波驱动的可见光频梳生成[J]. 光通信研究, 2025(6): 250265.

Pan Y L, Lu Z L, Zhou Y J, et al. Visible Light Frequency Comb Generation based on High-Frequency Mixing Wave Driving [J]. Study on Optical Communications, 2025(6): 250265.

基于高频混合波驱动的可见光频梳生成

潘云龙^{1,3,4}, 卢芝蓝^{1,3,4}, 周盈君², 迟楠^{1,3,4}

(1. 复旦大学 未来信息创新学院, 上海 200433; 2. 中国电信股份有限公司上海分公司, 上海 200120; 3. 上海低轨卫星通信与应用工程技术研究中心, 上海 200433; 4. 上海市低轨卫星通信技术协同创新中心, 上海 200433)

摘要:【目的】随着信息技术的高速发展和全球数据流量的激增,通信系统对高带宽、低时延和高可靠性的需求日益迫切,推动了信号频率向更高频段迁移。光学频率梳(OFCs)因其在高精度光谱学、光通信、量子信息处理和时频计量中的广泛应用而成为研究热点。相比于传统红外频梳,可见光频梳凭借其更高的带宽和更低的干扰特性,在天地一体通信和数据中心高速互联传输中展现出独特优势。然而传统红外频梳技术难以直接运用于可见光波段,因此文章研究旨在开发高效和低成本的可可见光频梳生成方法,以满足未来高速光通信需求。【方法】文章提出了一种在可见光波段基于多频的正弦波和锯齿波混合的波形驱动相位调制器来生成频梳的方法,在波形级直接进行倍频混频处理以降低硬件需求,同时结合正弦波的平坦性和锯齿波的宽谱性以提升生成的有效频梳数量。该方法无需复杂的级联结构,设备简单、成本低且可灵活调整调制参数,为实现高性能可见光频梳提供了高效和实用的解决方案。【结果】实验结果表明,在532 nm波段使用该方法可以在载波光功率10 dBm变化范围内生成34条有效频梳,频梳数量约为传统正弦波驱动的3倍,光谱密度显著增强。【结论】文章所提方法可以以低复杂性设备实现高效和平坦可见光频梳的生成,有望为未来第六代移动通信技术(6G)全光网络、数据中心互联和物联网提供高质量多载波源,具有广泛应用前景。

关键词:光通信;可见光频梳;多频混合波;电光调制

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Visible Light Frequency Comb Generation based on High-Frequency Mixing Wave Driving

PAN Yunlong^{1,3,4}, LU Zhilan^{1,3,4}, ZHOU Yingjun², CHI Nan^{1,3,4}

(1. College of Future Information Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. China Telecom Corporation Limited Shanghai Branch, Shanghai 200120, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Low-Earth-Orbit Satellite Communication and Applications, Shanghai 200433, China; 4. Shanghai Collaborative Innovation Center of Low-Earth-Orbit Satellite Communication Technology, Shanghai 200433, China)

Abstract: 【Objective】With the rapid development of information technology and the surge in global data traffic, the demand for high bandwidth, low latency, and high reliability in communication systems is becoming increasingly urgent, driving the migration of signal frequencies to higher bands. Optical Frequency Combs (OFCs) have become a research hot topic due to their wide applications in high-precision spectroscopy, optical communications, quantum information processing, and time and frequency metrology. Compared with traditional infrared frequency combs, visible light frequency combs have unique advantages in space-to-ground communications and high-speed interconnection transmission of data centers due to their higher bandwidth and lower interference characteristics. However, traditional infrared frequency comb technology is difficult to directly apply to the visible light band. Therefore, this study aims to develop an efficient and low-cost visible light frequency comb generation method to meet the needs of future high-speed optical communications. 【Methods】This paper proposes a method for generating frequency combs in the visible light band by driving a phase modulator using a waveform-driven multi-frequency mixture of sine and sawtooth waves. Direct frequency multiplication and mixing at the waveform level reduces hardware requirements, while combining the flatness of sine waves with the wide spectral characteristics of sawtooth waves to increase the number of effective frequency combs generated. This method eliminates the need for complex cascade structures, offers simple and low-cost equipment, and allows for flexible adjustment of modulation parameters, providing an efficient and practical solution for achieving high-performance visible light frequency combs. 【Results】Experimental results show that using this method in the 532 nm band can generate 34 effective frequency combs within a 10 dBm carrier optical power variation, which is approximately three times the number of frequency combs used in traditional sinusoidal wave drive, and the spectral density is significantly enhanced. 【Conclusion】This method can achieve efficient and flat visible light frequency comb generation with low-complexity equipment, which is expected to provide high-quality multi-carrier sources for future 6th Generation Mobile Communication Technology (6G) all-optical networks, data center inter-

收稿日期:2025-07-31; 修回日期:2025-08-04; 纸质出版日期:2025-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62031011)

作者简介:潘云龙(2001-),男,安徽芜湖人。硕士,主要研究方向为高速可见光通信、大容量可见光互连和可见光频梳的研究。

通信作者:迟楠,教授。E-mail:nanchi@fudan.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

connection and the Internet of Things, and has broad application prospects.

Key words: optical communication; visible light frequency comb; multi-frequency mixing wave; electro-optical modulation

0 引言

近年来,光学频率梳(Optical Frequency Combs, OFCs)因其在高精度光谱学^[1-2]、光通信^[3-4]、量子信息处理以及时间频率计量^[5-6]等领域的广泛应用而成为研究热点。在光通信中,OFCs通过生成一系列等间距和高相干性的频率线,为光通信系统提供了高效的多载波传输方案,能够显著提升数据传输速率和频谱效率。

当前,生成 OFCs 的主要方法包括基于锁模激光器的频梳、基于非线性光学的克尔频梳、微腔频梳以及电光调制频梳等多种技术路径。锁模激光器通过相位锁定激光腔内的多个纵模,生成宽带且高相干的 OFCs^[7-8],被广泛应用于高精度光谱学和时间频率计量,然而,其复杂的腔体设计、高昂的制造成本以及对环境稳定性的高要求限制了其在集成化和低成本应用中的推广;克尔频梳通过高品质因子微谐振腔中的非线性光学效应,生成宽带和高相干性的 OFCs^[9],常用于宽带光通信实验,然而,其生成需要精密的光学微腔和高功率泵浦激光器,同样导致设备复杂、制造成本高昂且对环境稳定性要求极高;微腔频梳与克尔频梳类似,依赖于微纳光子器件中的非线性效应,通过优化腔内光场和色散特性生成频梳^[10],微腔频梳的优势在于尺寸小和集成度高,但其设计和加工需要纳米级精度,且生成的频梳平坦度和梳线数量受限于腔体设计和材料非线性特性,难以满足高速通信系统对高性能频梳的需求;相比之下,电光调制频梳通过电光调制器对连续波激光进行相位或幅度调制,生成等间距的频梳线^[11],这种方法设备相对简单,易于实现,且通过调整调制信号的频率和幅度可以灵活控制频梳的间距和宽度。然而传统电光调制也有不足,其生成的频梳会因器件带宽限制和材料非线性效应的影响导致光谱宽度受限,且频梳高阶分量衰减迅速导致功率分布不均匀,难以满足高速光通信对宽光谱和高平坦度的需求。

传统 OFCs 的研究主要集中于红外波段,而近年来可见光通信(Visible Light Communication, VLC)因其高带宽、低干扰和节能环保的特性^[12-13],成为数据中心高速互联、卫星通信和物联网等领域的热点。VLC 需要高平坦度和高梳线数量的频梳以支持多载波传输,但传统的红外频梳技术因硬件

限制,难以直接应用于可见光波段,因此需要开发高效的可见光频梳生成方法。

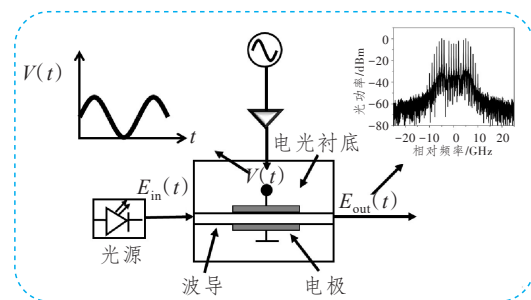
为了克服上述方法的局限性,本文对传统电光调制频梳生成法进行了改进,提出了一种基于混合波形驱动的相位调制方法,通过结合正弦波与锯齿波的多频调制,优化了可见光频梳的生成过程。仿真和实验结果同时表明,在 532 nm 波段,混合波形驱动能够在保持频梳高平坦度的同时显著增加梳线数量,为 VLC 和高精度光谱学等应用提供了更高效的解决方案。

1 电光调制频梳生成原理与波形级分析

图 1 所示为基于单个相位调制器(Phase Modulator, PM)的电光调制频梳生成原理示意图。PM 是一种集成的光学器件,其内部结构包括电光衬底、嵌入式波导和敷料电极,如图中心部分所示。在电光衬底上嵌入一块光波导,再通过外加射频信号 $V(t)$ 来改变电光衬底波导的折射率,实现光载波相位调制, t 为信号的时域变量。对于单个 PM,外加电压 $V(t)$ 导致的相位变化 $\Delta\phi_{\text{PM}}(t)$ 可表示为^[14]

$$\Delta\phi_{\text{PM}}(t) = \pi \frac{V(t)}{V_{\pi}}, \quad (1)$$

式中, V_{π} 为当输入光信号发生第 1 个 π 相移时所需的外加控制电压。



注: $E_{\text{in}}(t)$ 和 $E_{\text{out}}(t)$ 分别为单个 PM 的输入光场和输出光场。

图 1 电光调制频梳生成原理

Figure 1 Principle of electro-optical modulation frequency comb generation

当忽略调制器自身引起的恒定相移时,通过单个 PM 的输入光场 $E_{\text{in}}(t)$ 和输出光场 $E_{\text{out}}(t)$ 有着如下的关系:

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) e^{j\Delta\phi_{\text{PM}}(t)} = E_{\text{in}}(t) e^{j\frac{V(t)}{V_{\pi}}\pi}, \quad (2)$$

式中, j 为虚数项。以往的电光调制通常使用

正弦信号驱动 PM, 正弦调相信号可以表示为 $V(t) = V_m \sin(\omega_m t)$, 式中: V_m 为所使用的正弦信号幅度; $\omega_m = 2\pi f_m$ 为调制角频率, f_m 决定着电光调制生成频梳的频率间隔。将其代入式(1)中可以得到:

$$\Delta\phi_{PM}(t) = \pi \frac{V_m \sin(\omega_m t)}{V_\pi} = R \sin(\omega_m t), \quad (3)$$

式中, R 为调制指数, 通常被定义为式(3)中的 $\pi \frac{V_m}{V_\pi}$ 。假定用于频梳产生的光源为窄线宽的连续

波激光器, 并可表示为 $E_{in}(t) = Ae^{(j\omega_c t)}$, 式中: A 为光源的输出电场强度; ω_c 为光载波中心频率对应的角频率。将其与式(2)结合可以得到输出的光信号 $E_{out}(t)$ 为

$$E_{out}(t) = Ae^{(j\omega_c t)} e^{(jR \sin(\omega_m t))}. \quad (4)$$

将式中的相位调制项展开为频率分量的和, 对上式进行贝塞尔(Bessel)函数展开可以得到:

$$\begin{aligned} E_{out}(t) &= Ae^{(j\omega_c t)} e^{(jR \sin(\omega_m t))} = Ae^{(j\omega_c t)} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(R) e^{(jn\omega_m t)} \\ &= A \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(R) e^{[j(\omega_c + n\omega_m)t]} \end{aligned}, \quad (5)$$

式中, $J_n(R)$ 为 n 阶第一类贝塞尔函数, 输出电场包含多个频率分量形成了多载波光谱。各载波的角频率为 $\omega_c + n\omega_m$, 对应频率为 $f_c + nf_m$, n 为任意整数, 各载波间隔为 f_m , 振幅为 $AJ_n(R)$ 。对于正弦波驱动的多载波, 可以发现振幅中的贝塞尔函数 $J_n(R)$ 在低阶范围内变化平缓, 而高阶分量的振幅则由贝塞尔函数渐进行为决定, 公式如下:

$$J_n(R) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi n}} \left(\frac{eR}{2n} \right)^n. \quad (6)$$

这样的特点决定了正弦波驱动 PM 生成的频梳有以下两个特点: 首先是频梳平坦度较高, 低阶的载波功率分布均匀, 适合高谱效率通信; 其次是载波数量较少, 其高阶分量会呈指数衰减, 有效载波数少。正弦波驱动 PM 生成频梳的方法难以满足需要更宽光谱或更多载波的场景, 为克服这一局限性, 探索非正弦波驱动信号的效果具有一定的研究意义。锯齿波作为一种非正弦周期信号, 其线性相位调制特性包含丰富谐波分量, 标准锯齿波是指在振幅 V_m 内线性上升且周期性突降的波形, 在一个周期 T_m 内, 锯齿波可以表示为

$$V(t) = V_m \cdot \frac{t}{T_m}, 0 \leq t < T_m. \quad (7)$$

同样结合式(2)可以得到输出的光信号 $E_{out}(t)$ 为

$$E_{out}(t) = Ae^{(j\omega_c t)} \cdot e^{(jR \frac{t}{T_m})}, 0 \leq t < T_m. \quad (8)$$

式(8)中的后项相位调制项是周期函数, 对其进行傅里叶级数展开:

$$\begin{aligned} e^{(jR \frac{t}{T_m})} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{(jn\omega_m t)}, \\ c_n &= \frac{1}{j(R - 2n\pi)} \{ e^{[j(R - 2n\pi)]} - 1 \}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$P_n \propto |c_n|^2 \approx \frac{1}{n^2 \pi^2},$$

式中, c_n 为傅里叶系数。需要说明的是, 对于 c_n , 当 R 值刚好为 $2n\pi$ 时, 此时分母为 0 等式, 无意义, 可通过极限法则对该点进行计算, 最终结果为 1。此外, 在实际实验中, 几乎不会精确地遇到 $R = 2n\pi$ 的情况, 并且我们可以通过微调驱动电压以避免此特殊情况。对其傅里叶系数 c_n 求解得到式(9), 生成的频梳功率正比于系数幅度的平方, 由式(9)中的最下方关于功率的式子可以发现锯齿波生成的频梳功率低阶变化显著, 而高阶分量时功率按照 $\frac{1}{n^2}$ 呈平方衰减, 远慢于正弦波的指数衰减, 因此理论上锯齿波可以生成更多有效频梳, 但平坦度不及正弦波调制频梳。

由上述推导分析可知, 正弦波和锯齿波在生成多载波的特性上完全不同但却相互互补, 基于正弦波的调制频梳平坦度较高但有效数量较少, 锯齿波的调制频梳平坦度较差但有效数量较多。如图 2 所示, 使用正弦波和锯齿波的混合波形驱动 PM 生成频梳, 通过调制两种信号的权重和相位差, 结合两种波形驱动的优点, 在最佳工作点上可能获得有效载波多且平坦度较高的可见光频梳以满足大容量 VLC 需求。

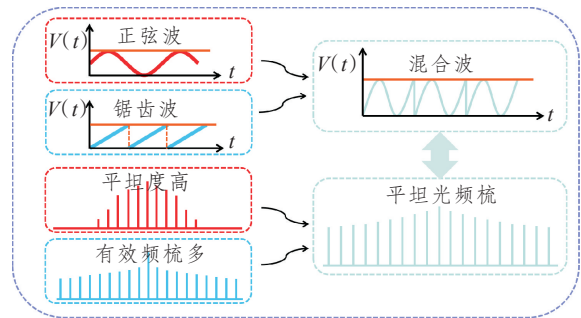
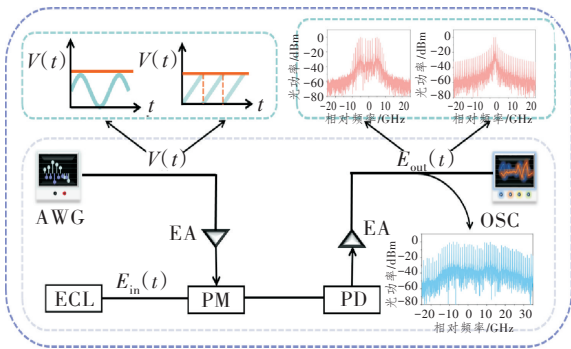


图 2 使用混合波形生成平坦多载波

Figure 2 Flat multicarriers generation using hybrid waveforms

2 仿真结果与分析

为了对图 2 中的观点进行验证,我们设计了图 3 所示基于 PM 的电光调制频梳的简易实验。首先光载波通过连续波(Continuous Wave, CW)激光器生成并发送给 PM,同时通过任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)发送不同波形的驱动信号,经过电放大器(Electrically Altered Amplifier, EA)后驱动 PM。输出光信号被光接收器(Photodiode, PD)所接收并转换为电信号再经过 EA 进行放大,最后通过示波器(Oscilloscope, OSC)观察生成的频梳效果。我们使用仿真软件 VPI TransmissionMaker 对图 3 的频梳生成过程进行了仿真验证。



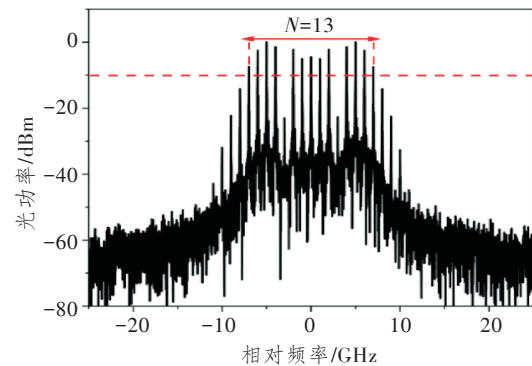
注: ECL 为外腔激光器。

图 3 不同波形的电光调制频梳实验

Figure 3 Experiments on electro-optical modulation frequency comb with different waveforms

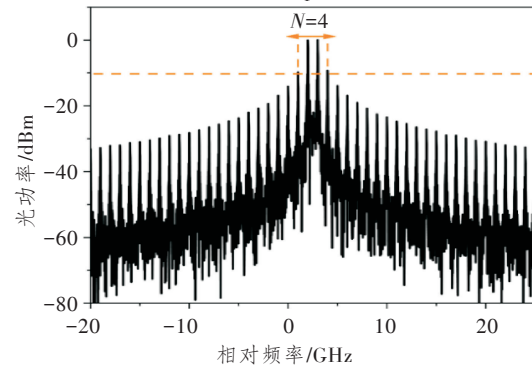
具体仿真设置包括 1 个 532 nm 的 CW 激光器,输出功率为 1 mW(0 dBm),线宽为 10 MHz 和 1 个理想的 PM。通过 Matlab 仿真软件联合仿真将所需的驱动信号传给 PM,驱动信号频率设置为 1 GHz。根据理论分析,不同波长的光源并不会影响生成频梳的数量和平坦度,只会决定生成频梳的中心频率,仿真选取的 535 nm 激光器主要是为了匹配实际实验中激光器的选取。需要说明的是,实际中调制器对于不同波长的光源具有不同的半波电压值,但可通过控制 EA 和衰减器对调制电压进行相应的控制以保持调制指数不变。根据第 1 章的公式,在驱动信号不变的情况下,频梳性能随调制指数 R 变化,理论上 R 越大,生成的有效频梳数量越多,但实际实验中不可能无限增大驱动电压以无限增大 R 。可见光波段的调制器线性工作电压范围常为 $0 \sim 2V_{\pi}$,因此仿真实验参考了实际硬件的限制,选取 $V(t)$ 的值为半波电压 V_{π} 的两倍以固定调制指数为 2π 。同时由于仿真中忽略了损耗,因此不需要

使用 EA 补偿传输过程中因硬件导致的功率损失,并可以直接观察生成的光谱图。对此系统先后分别使用正弦波和锯齿波进行驱动调制,获得了图 4 所示的模拟光谱图,由图可知,正弦波调制频梳数量是明显少于锯齿波调制的,符合理论分析。但生成过低功率的频梳在实际传输中容易被噪声淹没导致信噪比下降,在 VLC 系统中,每个频梳的功率需足以被 PD 检测并转换为电信号,同时需要保证足够的信噪比以支持低误码率传输。 -10 dBm 是光通信系统中常见的功率阈值,能够满足典型光电探测器的灵敏度要求,确保信号在噪声背景下的可检测性。因此将生成的功率 > -10 dBm 的频梳记为有效频梳,可以发现,使用正弦波驱动获得了满足阈值的 13 条有效频梳,在低阶分量平坦度较高但高阶分量迅速衰减。而锯齿波只获得了 4 条高功率频梳,在低阶分量变化明显,但高阶分量衰减较缓。在平坦度方面,仿真的结果也与我们的理论推导结果相同,接下来仿真正弦波和锯齿波的混合波驱动。



(a) 正弦波电光调制

(a) Sine wave electro-optical modulation



(b) 锯齿波电光调制

(b) Sawtooth electro-optical modulation

注: N 为生成的有效频梳数量。

图 4 正弦波和锯齿波电光调制频梳光谱图

Figure 4 Sine wave and sawtooth wave electro-optical modulation frequency comb spectrum

对于正弦波和锯齿波的混合波形,其时域表达式为

$$V_{\text{mix}}(t) = \omega_1 V_m \sin(\omega_m t) + \omega_2 V_m \left[\frac{\omega_m(t + \frac{\theta}{\omega_m})}{\pi} - 1 \right], \quad (10)$$

式中： $V_{\text{mix}}(t)$ 为最终的混合波形表达式； ω_1 和 ω_2 分别为混合波形中正弦波和锯齿波的权重； θ 为两波形之间的相位差，为统一后续的混合波形，都将相位差添加到了后项中。两种不同波形的频率都设置为 ω_m 以保证生成的频梳间隔相等，在混合波形中非倍频组合以外的不同频率调制信号的叠加会导致生成频梳的间隔不单一，并生成复杂的频率分布，非等间隔的频梳会影响多载波传输的稳定性。可以发现，在调制指数不变的情况下，决定其生成频梳数量的因素只有两波形的相位差 θ 和权重比例 ω 。混合波形的参数调节通过Matlab软件设计实现并通过联合仿真直接发送给PM。首先对这两个因素同时进行遍历以寻找混合波形生成有效频梳的最佳工作点，其中遍历的权重规定为正弦波的权重，范围从0到1，步长为0.1，锯齿波的权重通过两权重之和恒为1得出，相位差从0到 2π 变化，步长为 0.25π 。为了直观地观察权重和相位的影响，将遍历结果绘制成图5所示的等高线图。由图可知，在相位差不变的情况下，随着正弦波权重的逐渐增大，生成的有效频梳数量呈现先增后减的效果，这与我们的理论推导相符，当正弦波权重过大时，混合波特性与普通的正弦波相同。相位差呈现出了对称性，与理论相符，最终获得了A和B两个最佳工作点。以A点为例，此时正弦波所对应的权重为0.6，两波形间的相位差为0。根据对称性，当两波形的权重和相位满足任意一点时，此时混合波形生成的有效频梳数量最多。

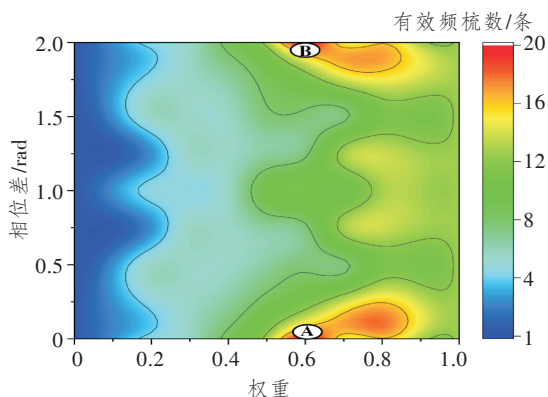


图5 基于混合波形生成有效频梳的遍历结果等高线图

Figure 5 Contour plot of traversal results based on hybrid waveforms to generate effective frequency combs

图6所示为最佳工作点获得的模拟光谱图，基于混合波形驱动的电光调制获得了20条有效频梳，由图显见其对于单一波形驱动的性能提升。

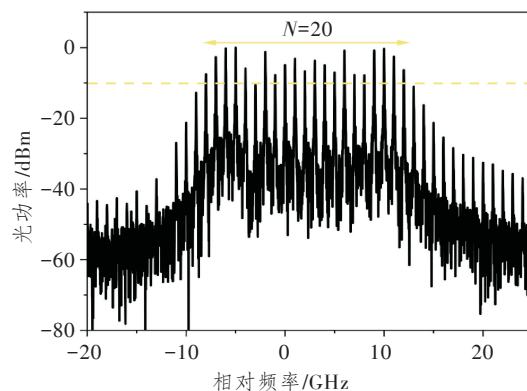


图6 最佳工作点下混合波形电光调制的光谱图
Figure 6 Spectrum of electro-optical modulation of hybrid waveform at the optimal working point

在红外波段，光频梳研究常通过倍频驱动信号驱动级联PM以展宽光谱，从而显著增加频梳数量。从理论上讲，这种方法在可见光波段同样可行。然而，我们的实验发现，受限于可见光波段调制器的带宽和材料非线性效应，倍频驱动会导致较大的光功率衰减，使得该方法在当前实验条件下难以满足实际应用需求。此外，级联PM中基频与倍频信号的不同调制指数会对光频梳的生成特性产生复杂影响，而本研究旨在聚焦于调制波形本身对光频梳生成效果的直接影响。因此，本实验固定调制指数 R ，通过在波形级直接对基频与倍频信号进行混合处理从而达到级联PM的效果。以正弦波为例，基频和倍频的正弦波的混合波形表达式为

$$V_{\text{mix}}(t) = \omega_1 V_m \sin(\omega_m t) + \omega_2 V_m \sin(2\omega_m t + \theta). \quad (11)$$

光载波经过此混合波形驱动的PM后的输出表达式为

$$E_{\text{out}}(t) = A e^{(j\omega_c t)} \cdot e^{j[\omega_1 R \sin(\omega_m t) + \omega_2 R \sin(2\omega_m t + \theta)]}. \quad (12)$$

由式(12)可知，倍频项的引入在保持频率间隔不变的情况下显著扩展了光谱宽度，从而得到了更多的有效频梳。为系统性比较不同波形对光频梳生成的影响，本研究对比了多频正弦混合波、多频正弦锯齿混合波、多频锯齿混合波以及前文得到的最佳工作点的混合波的多频组合。需要区别说明的是，此处的多频正弦锯齿混合波为基频的正弦波和倍频的锯齿波的组合，而多频混合波为前文中A点所对应混合波的多频组合。对于每种波形组合，首先使用遍历法优化权重和相位差，取得各自的最佳工作

点,随后对这些最佳工作点生成的有效频梳数量进行对比。图 7(a)~图 7(d)所示为上述 4 种多频混合波形驱动 PM 生成的模拟光谱图,分别生成了 25、15、9 和 37 条有效频梳。其中,多频混合波将有效梳齿数量从单频正弦波的 13 条提升至 37 条,性

能约提升 3 倍。图 7(e)所示为多频混合波遍历结果的等高线图,其中 C 和 D 两点为其最佳工作点,以 C 点为例,此时所对应的倍频信号的权重为 0.8,相位差为 $\pi/2$ 。

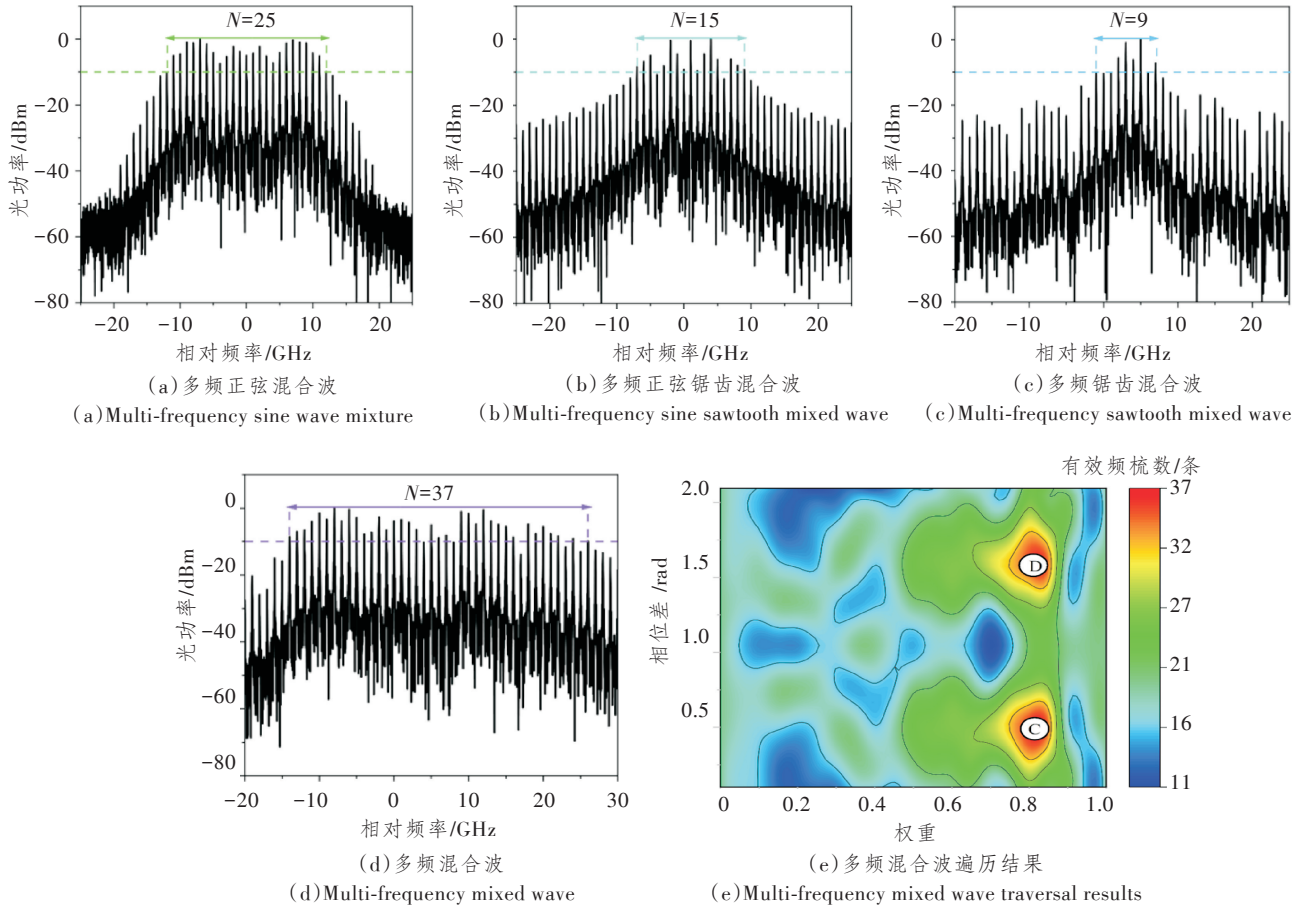


图 7 不同多频混合波形生成的光谱图和多频混合波工作点遍历图

Figure 7 Spectrum diagrams and multi-frequency mixing wave working point traversal diagrams generated by different multi-frequency mixing waveforms

另外,在其他参数不变的情况下,理论上调制指数 R 越大,生成的多载波数量越多,受限于实验硬件的驱动电压范围,本实验选取 R 的变化范围为 $0 \sim 2\pi$,在图 8 中绘制出了单频正弦波、单频混合波、多频正弦波和多频混合波 4 种波形随着 R 的增大生成有效频梳的变化情况。结果表明,当 R 的较小时,4 种波形的有效频梳数量基本接近,随着 R 的增大,多频波形与单频波形生成效果逐渐拉开,其中本实验得到的最佳混合波的增长速率远超其他波形。

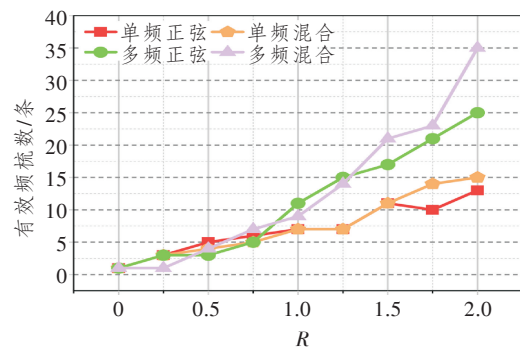


图 8 不同多频混合波形生成有效载波数量与调制指数 R 的关系

Figure 8 Relationship between the number of effective carriers and modulation index R generated by different multi-frequency mixed waveforms

3 实验设置与结果

按照上文的仿真分析,我们搭建了如图 9 所示的实际实验系统,用于验证实际实验中波形对生成频梳效果的提升。实验使用 1 个 532 nm 的 CW 激光器发送光载波,线宽约为 10 MHz,输出功率为 0 dBm。多种混合波形通过提前编写的文件发送给 AWG 生成,采样率设置为 12 GSa/s,并经过 EA 进行放大后驱动 PM。实验使用的 PM 半波电压为 4 V,通过控制 EA 和衰减器使得调制电压与仿真设置相同。受限于 EA 的带宽限制为 4 GHz,驱动信号的基频和倍频分别设置为 100 和 200 MHz,此设置的不同只会影响生成的频梳间隔。在接收端,光信号通过 PD 接收转换为电信号,再经过另一个 EA 放大后使用 OSC 观察频梳生成情况并接收数据。实验过程中,环境温度控制在 $25\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以确保激光器和调制器的稳定性。

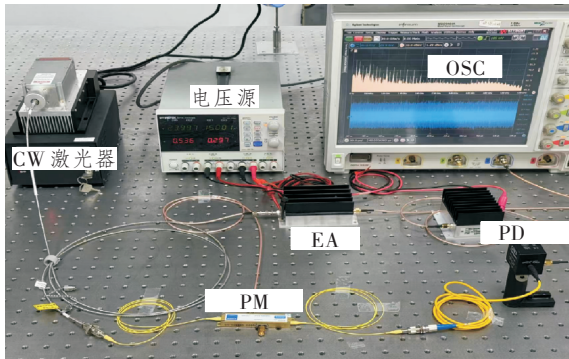
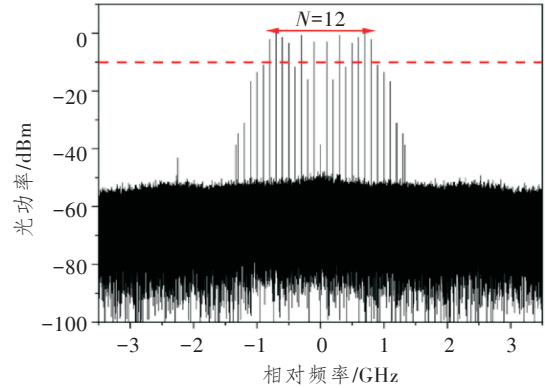


图 9 基于电光调制的频梳生成实际实验图

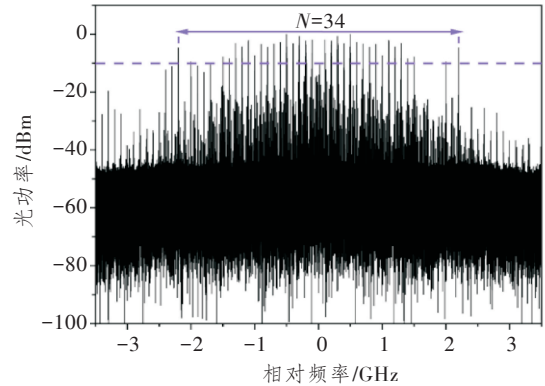
Figure 9 Experimental setup of frequency comb generation based on electro-optical modulation

图 10 所示为单频正弦波和多频混合波驱动生成的实际光谱图,验证了混合波形驱动在提升可见光频梳生成效率方面的优越性,并与仿真结果高度一致。实验结果表明,单频正弦波驱动生成了 12 条有效频梳,其低阶分量功率分布均匀,但高阶分量功率衰减严重,有效频梳数量受限。与之相比,多频混合波形驱动总共生成了 34 条有效频梳,约为单频正弦波的 3 倍,光谱宽度和梳线数量获得了显著提升。实际光谱图显示,多频混合波形生成的频梳在低阶分量保持较高平坦度的同时,高阶分量功率衰减明显减缓。在仿真中多频混合波形将有效频梳数量从单频正弦波的 13 条提升到了 37 条,性能同样提升至约 3 倍。在实际实验中生成的有效频梳数量略少于仿真,主要是由于硬件限制导致的功率损耗和调制效率下降。



(a) 单频正弦波

(a) Single-frequency sine wave



(b) 多频混合波

(b) Multi-frequency mixed wave

图 10 实际实验生成频梳图

Figure 10 The generated frequency comb diagrams in the experiment

4 结束语

可见光频梳以其高光谱密度和稳定频率输出,对构建高效和安全的下一代 VLC 系统具有重要意义,可广泛应用于数据中心、卫星通信和物联网。本文提出了一种基于混合波形驱动 PM 生成可见光频梳的方案,在传统的正弦波电光调制基础上叠加了锯齿波,将两种波形对于频梳生成的优点相互结合,通过波形级倍频混频处理,显著提升了频梳生成效率。本文使用 VPI 软件仿真验证了多频混合调制的优越性和可行性,最终通过实际实验得到验证。结果表明,本文所提方案生成的有效频梳数量约为传统正弦波调制的 3 倍,光谱密度显著增强。然而实验中也有不足,未在实际通信场景中测试频梳性能,将该技术应用于实际高速光通信系统时,仍需进一步解决由波形非线性和器件非理想性等因素引入的相位噪声问题。未来的研究将致力于从硬件和算法层面优化,以实现相对相位噪声的有效抑制,从而为实时的高速 VLC 系统提供更稳定和更高质量

的多载波源,推动第六代移动通信技术(6th Generation Mobile Communication Technology, 6G)和全光网络技术的发展。

参考文献:

- [1] 马湘泽, 龙玮, 程杰, 等. 基于电光强度调制脉冲拾取的高分辨率双光梳光谱技术研究[J]. 中国激光, 2025, 52(11): 243–249.
Ma X Z, Long W, Cheng J, et al. High Resolution Dual-Comb Spectroscopy based on Electro-Optic Intensity Modulation Pulse Picking [J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(11): 243–249.
- [2] 马泽军, 马钰, 刘峰奇, 等. 基于量子级联激光器的光频梳研究应用综述[J]. 计测技术, 2024, 44(4): 29–46.
Ma Z J, Ma Y, Liu F Q, et al. Review on Research and Applications of Optical Frequency Combs based on Quantum Cascade Lasers [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(4): 29–46.
- [3] 金冠宇, 陈禹先, 张绪成, 等. 基于布里渊激光腔的O-U波段平坦光频梳的噪声分析[J]. 发光学报, 2025, 46(6): 1139–1150.
Jin G Y, Chen Y X, Zhang X C, et al. Noise Analysis of a Flat Optical Frequency Comb in O-U Band based on a Brillouin Laser Cavity [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2025, 46(6): 1139–1150.
- [4] Song H J, Shimizu N, Furuta T, et al. Broadband-Frequency-Tunable Sub-Terahertz Wave Generation Using an Optical Comb, AWGs, Optical Switches, and a Uni-Traveling Carrier Photodiode for Spectroscopic Applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(15): 2521–2530.
- [5] Koke S, Grebing C, Frei H, et al. Direct Frequency Comb Synthesis with Arbitrary Offset and Shot-Noise-Limited Phase Noise [J]. Nature Photonics, 2010, 4(7): 462–465.
- [6] Stern B, Ji X, Okawachi Y, et al. Battery-Operated Integrated Frequency Comb Generator [J]. Nature, 2018, 562(7727): 401–405.
- [7] 丁梓轩, 汪国瑞, 周新新, 等. 高重复频率光纤光频梳技术研究进展(特邀)[J]. 光学学报(网络版), 2025(11): 4–26.
Ding Z X, Wang G R, Zhou X X, et al. Recent Progress in High-Repetition-Rate Fiber-based Optical Frequency Comb Technology (Invited) [J]. Acta Optica Sinica (Online), 2025(11): 4–26.
- [8] 宋鹏荣, 陶家宁, 应鹏润, 等. 基于全正色散光纤锁模激光器的波长可调光谱平顶单腔双光梳[J]. 中国激光, 2024, 51(14): 88–94.
Song P Y, Tao J N, Ying P R, et al. Single-Cavity Dual-Comb with Tunable Wavelength and Flat-Topped Spectrum based on All-Normal Dispersion Fiber Mode-Locked Laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(14): 88–94.
- [9] 常冰, 顾逸阳, 何欣玥, 等. 片上集成克尔光梳在光学传感领域的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(19): 1913019.
Chang B, Gu Y Y, He X Y, et al. Applications Research of on-Chip Integrated Kerr Optical Frequency Comb in Optical Sensing Field [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(19): 1913019.
- [10] 王阳. 集成微腔光频梳及精密测量应用研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2025.
Wang Y. Research on Integrated Microcavity Optical Frequency Comb and Its Precision Measurement Application [D]. Xi'an, China: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2025.
- [11] Zhang J, Yu J, Tao L, et al. Generation of Coherent and Frequency-Lock Optical Subcarriers by Cascading Phase Modulators Driven by Sinusoidal Sources [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3911–3917.
- [12] Chi N, Zhou Y, Wei Y, et al. Visible Light Communication in 6G: Advances, Challenges, and Prospects [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 93–102.
- [13] Chi N, Haas H, Kavehrad M, et al. Visible Light Communications: Demand Factors, Benefits and Opportunities Guest Editorial [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 5–7.
- [14] Yu J, Dong Z, Zhang J, et al. Generation of Coherent and Frequency-Locked Multi-Carriers Using Cascaded Phase Modulators for 10 Tb/s Optical Transmission System [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 458–465.