

光频梳技术在微波光子学中的应用

刘娅, 方宵, 白明, 郑铮

北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083

摘要 光频梳是一种具有若干等频率间隔和窄线宽的相干谱线的一种新型光源。本文介绍了国内外电光调制和非线性微腔等光频梳产生技术, 并分析了其在微波光子信号生成、变换和接收等方面的应用及前景。

关键词 光频梳; 微波光子学; 微环谐振腔

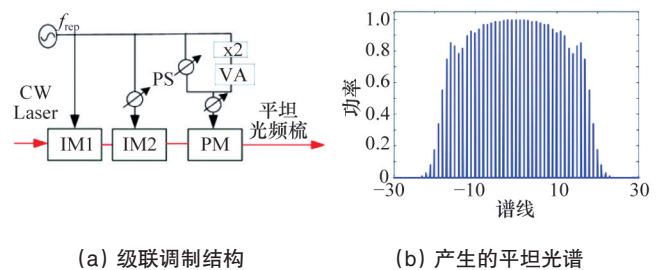
自 20 世纪 70 年代以来, 光子技术与微波技术得到快速发展。对于微波信号的传输来讲, 可以利用光纤系统低损耗、高带宽等特性; 而高容量光纤信息系统中又必须涉及到高频、大带宽的微波技术。因此, 它们之间的紧密结合逐渐形成了一门新兴学科——微波光子学。目前, 微波光子学在器件和系统方面有着众多研究方向, 其中, 光频梳技术在信号变换中所具有的特殊作用使其在近年来得到日益增长的关注和研究。光频梳是由一系列等频率间隔的、窄线宽的相干光波组成的一种新型光源。它在频谱上看起来就像是整齐排列的梳齿, 故此得名。光频梳能广泛应用于精密光谱^[1]、时间和频率的计量^[2]、时钟的同步和校准^[3]、高带宽任意波形产生^[4]等领域。传统脉冲锁模激光器的光频梳虽然有较宽的频谱, 但其频率间隔通常小于 1 GHz。本文介绍能够应用于微波光子学中的基于电光调制和硅基微腔两种光频梳的产生方法及应用。

1 电光调制光频梳的产生及应用

基于对连续光进行电光相位调制的光频梳产生方法具有梳齿间距可调、光梳性能好、结构相对简单等优点, 成为了近年来的研究和应用热点。通过采用不同的调制器或其组合能够产生具有不同特性的光频梳。2007 年, 日本国家信息与通讯技术研究所(National Institute of Information and Communications Technology)利用单个传统的双级 MZM 实现了 10 dB 范围内带宽达 230 GHz 的可调谐超平坦光频梳^[5-6]。

鉴于目前大多数光频梳在保证光谱平坦度前提下, 谱线条数受限或者在保证谱线条数前提下, 光频平坦度受限的问题, 2010 年美国普渡大学 Weiner 研究组采用强度和相位调制器级联的方法实现了宽带光频梳^[7], 其原理及结果如图 1 所示, 该方案实现了 1 dB 范围内 380 GHz 的宽带光频梳。同

时, 该方案的色散特性较好, 可以利用在标准单模光纤中传播实现高质量的脉冲压缩。为了进一步扩大的平坦光频梳的带宽, 他们对级联调制产生的光频梳进行非线性展宽^[8], 通过高非线性光纤的四波混频等非线性效应来产生更多的谱线。该方案能够实现 1 dB 范围内大于 750 条的超宽带平坦谱线。



(a) 级联调制结构 (b) 产生的平坦光谱

图 1 采用强度和相位调制器级联的光频梳产生
Fig. 1 Optical frequency comb generated by intensity and phase modulators

电光调制所产生的光频梳梳齿间具有相干性, 因此梳齿间的相互拍频能够产生低相位噪声的微波信号。而传统数字微波元件(合成器和模数转换器)受系统带宽限制, 瞬时带宽、杂散电平、频率捷变时间以及相位噪声等都无法满足高质量信号产生的要求。相比之下, 在光域进行倍频或上变频则所受限制较小, 因此近来进行了大量研究。通常光生毫米波的方案主要包含 3 个部分: 调制光频梳产生、光学滤波选频以及光电转换, 用来生成上变频毫米波信号。也可以在调制时抑制其不需要的谐频分量, 避免使用光学滤波。2008 年, Ho-Jin Song 等^[9]采用对调制生成的光频梳进行非线性光纤加密和光学滤波的方式实现了 100~300 GHz 的可调输出, 相噪约 -80~-100 dBc/Hz@10 kHz, 其原理和结果如图 2 所示。

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-08-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB315601)

作者简介: 刘娅, 博士后, 研究方向为微波光子学, 电子信箱: liuya@buaa.edu.cn; 白明(通信作者), 教授, 研究方向为电磁场与微波技术, 电子信箱: mbai@buaa.edu.cn

引用格式: 刘娅, 方宵, 白明, 等. 光频梳技术在微波光子学中的应用[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 112-115; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.014

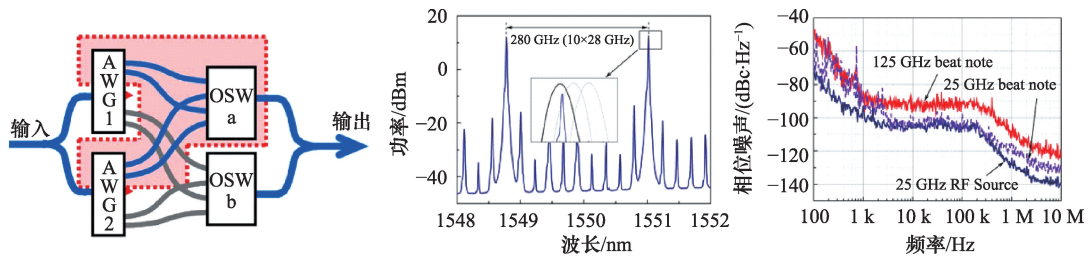


图2 拍频产生的可调微波信号及其相噪

Fig. 2 Broadband-frequency-tunable wave generation and phase noise

在接收方面,光频梳技术的出现给设计高频宽带微波光子接收机带来了新的思路。由于电光调制产生的光频梳梳齿之间具有的相干性,可以用来作为接收机的本振信号。近年来,利用光频梳进行微波信号接收和下变频的方案被大量研究和报道^[10-12]。为进一步提高可接收微波信号的频率,2014年,北京邮电大学徐坤研究组提出采用2个具有不同频梳间隔的双光频梳作为本振信号,通过窄带光波分复用器将光梳进行信道化的宽带接收,有效地抑制中频信号的杂散,提高中频信号的指标^[13]。

多信道化方案依赖于昂贵的波分复用装置,并且系统结构复杂,难以实现工程实用化。针对以上问题,提出了可调频梳间隔的单光频梳方案^[14],具体方案如图3所示。该方案将同一个激光器产生的光信号分为2路,一路用于调制未知的微波信号,另一路用来产生光频梳,然后进行耦合和光电转换,产生小于光频梳重复频率的中频信号,如图4所示。该光频梳的重复频率可调,因此可以产生不同频率的中频信

号。通过简单的数学运算计算出未知微波信号的频率,实现对未知微波信号的测频。该方案实现了对0~20 GHz范围内未知微波信号的测频,并且装置简单、灵活度高,为宽带微波光子接收机的工程化提出了新的思路。

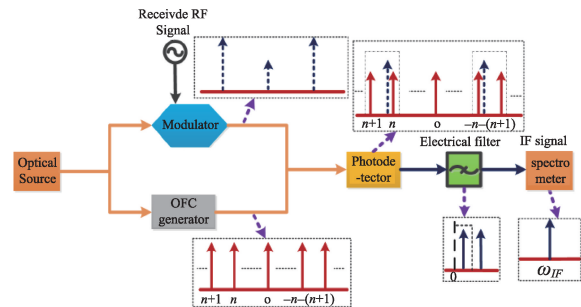


图3 可调频梳间隔的单光频梳接收方案

Fig. 3 Schematic diagram of photonic system of down-converting microwave signals

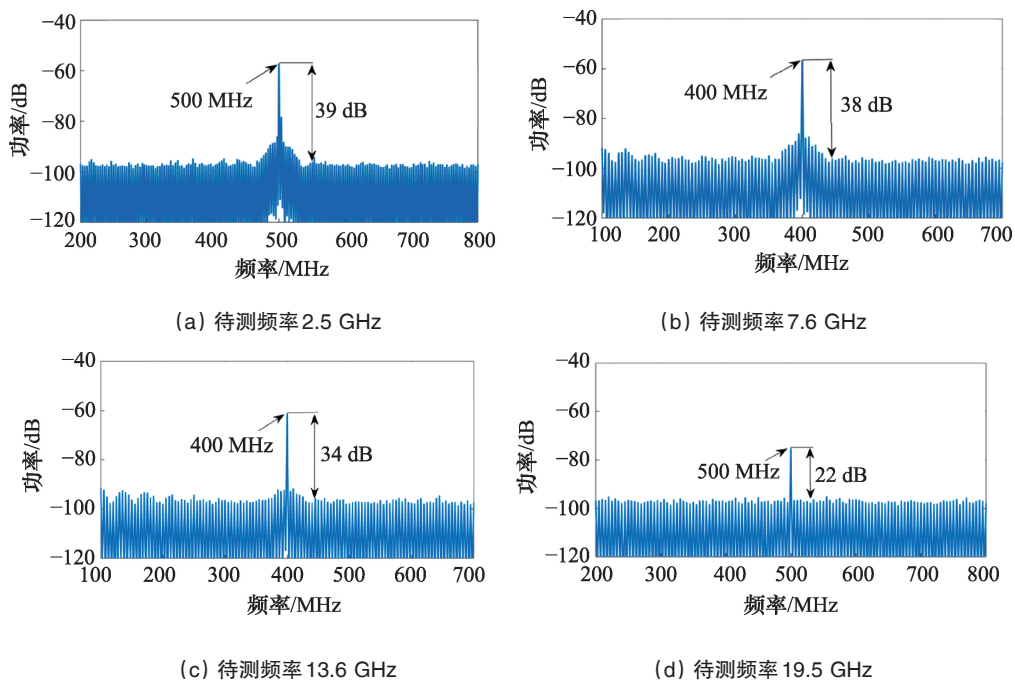


图4 不同频率的微波信号进行下变频的结果

Fig. 4 Measured IF signals down-converted from different received RF signals

2 微腔光频梳技术

电光调制光频梳需要较大的电驱动功率和较复杂的系统结构,同时生成的高阶光频梳梳齿的相干性会逐渐劣化,基于光学克尔效应的新型微腔光频梳产生技术^[15]具有器件结构紧凑、易于集成的潜在巨大优势,近年来成为国际研究热点,得到了迅猛发展。其核心部件是一个具有非线性效应的光学微腔。泵浦光通过微腔的场增强效应,以级联的四波混频(FWM)过程产生新的频率分量并在微腔内共振增强,频率分量间的频差精确等于微腔的自由频谱范围(FSR)。2007年由德国 Max-Planck 研究所 Kippenberg 等使用二氧化硅微复曲面结构首次实现了微腔光梳^[16]。为了实现真正意义上的硅基集成光频梳源,片上非线性光波导微环腔获得了更多关注。其不仅能实现与波导耦合,且与集成芯片 CMOS 制备技

术兼容,便于大批量加工。2010年,美国康奈尔大学的 Lipson 组首次实现了硅基高品质因数氮化硅微环的光频梳^[17],如图 5 所示。在国内,我们课题组率先提出并实验研究了基于光梳梳齿反馈的方式进行微腔光梳生成过程调控的思路,并在降低泵浦阈值、调控波长间隔与噪声特性方面取得了一定的实验效果^[18],为硅基微腔光梳光源的进一步实用化提供了方向。

自其出现起,硅基微腔光梳光源就作为实现特殊光源的一条新途径受到国内外各研究组的广泛关注^[17,19-22]。美国康奈尔大学的 Lipson 组以及德国 KIT 学院 Koos 组进行了大量多波长传输实验,证明微腔光梳光源在高速传输下的性能可以达到与传统 DFB 激光器的相同水平^[20]。图 6 所示为 2013 年 Koos 组在微腔光梳的 6 个相邻波长首次实现对光源噪声特性

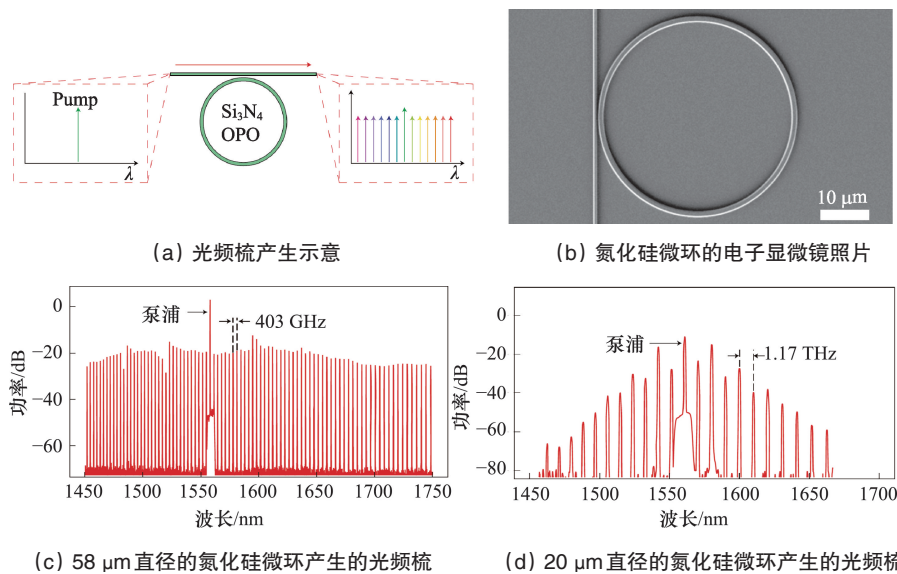


图 5 基于氮化硅微环的光频梳

Fig. 5 On-chip optical parametric oscillator

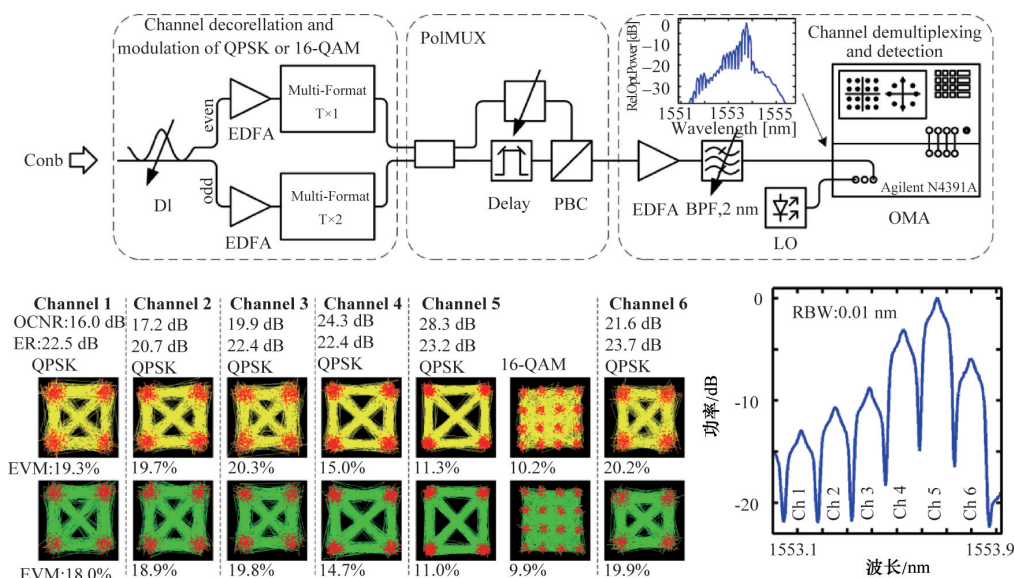


图 6 基于氮化硅微环的多波长光源的 QPSK 和 16QAM 传输实验

Fig. 6 Data transmission setup and results

要求较高的 16QAM 和 QPSK 相干调制传输,其 WDM 通信速率总计可达 392 Gbit/s^[21],证明相干光梳完全可满足高速乃至相干光通信的要求。这为后续相干调制微腔光频梳应用于微波光子相关的应用奠定了关键基础。因此,基于微腔光频梳的任意波形生成的方面研究在国外已得到一定的探索,值得进一步跟踪与研究。

3 结论

光频梳在微波光子信号生成、变换和接收等方面取得了重要的研究进展。为了实现光频梳光源进一步实用化,如何增大光谱的可用率以及稳定性是今后研究中所要解决的主要问题。

参考文献 (References)

- [1] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, 288(5466): 635-639.
- [2] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
- [3] Takamoto M, Hong F L, Higashi R, et al. An optical lattice clock[J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 321-324.
- [4] Jiang Z, Huang C B, Leaird D E, et al. Optical arbitrary waveform processing of more than 100 spectral comb lines[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(8): 463-467.
- [5] Sakamoto T, Kawanishi T, Izutsu M. Widely wavelength-tunable ultra-flat frequency comb generation using conventional dual-drive Mach-Zehnder modulator[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(19): 1.
- [6] Sakamoto T, Kawanishi T, Izutsu M. Optical frequency comb generation using asymmetrically Mach-Zehnder modulator[J]. *Optical Communication. ecoc. european Conference on*, 2005, 3(3): 743-744.
- [7] 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.
- [8] Supradeepa V R, Weiner A M. A broadband, spectrally flat, high repeat rate frequency comb: Bandwidth scaling and flatness enhancement of phase modulated CW through cascaded four-wave mixing[C]//*Optical Fiber Communication Conference*. Los Angeles: Optical Society of America, 2011: OMQ3.
- [9] 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.
- [10] Leaird D E, Weiner A M. Simultaneous broadband microwave down-conversion and programmable complex filtering by optical frequency comb shaping[J]. *Optics letters*, 2012, 37(19): 3993-3995.
- [11] Wiberg A O J, Liu L, Tong Z, et al. Photonic preprocessor for analog-to-digital-converter using a cavity-less pulse source[J]. *Optics Express*, 2012, 20(26): B419-B427.
- [12] Zhao Y, Pang X, Deng L, et al. Ultra-broadband photonic harmonic mixer based on optical comb generation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(1): 16-18.
- [13] Yang X, Xu K, Yin J, et al. Optical frequency comb based multi-band microwave frequency conversion for satellite applications[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 869-877.
- [14] Fang X, Bai M, Ye X, et al. Ultra-broadband microwave frequency down-conversion based on optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17111-17119.
- [15] Kippenberg T J, Holzwarth R, Diddams S A. Microresonator-based optical frequency combs[J]. *Science*, 2011, 332(6029): 555-559.
- [16] Del'Haye P, Schliesser A, Arcizet O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator[J]. *Nature*, 2007, 450(7173): 1214-1217.
- [17] Levy J S, Gondarenko A, Foster M A, et al. CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(1): 37-40.
- [18] Jiang Y, Zhao X, Wang J, et al. Robust and controllable generation of frequency combs in microresonators with selected sideband feedback [C]//*Optical Fiber Communication Conference 2014*. San Francisco: Optical Society of America, 2014: Th2A.57.
- [19] Levy J S, Saha K, Okawachi Y, et al. High-performance silicon-nitride-based multiple-wavelength source[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(16): 1375-1377.
- [20] Pfeifle J, Weimann C, Bach F, et al. Microresonator-based optical frequency combs for high-bitrate WDM data transmission[C]//*Optical Fiber Communication Conference*. Los Angeles: Optical Society of America, 2012: OW1C. 4.
- [21] Pfeifle J, Laueremann M, Wegner D, et al. Microresonator-based frequency comb generator as optical source for coherent WDM transmission[C]//*Optical Fiber Communication Conference*. Los Angeles: Optical Society of America, 2013: OW3C. 2.
- [22] Pfeifle J, Brasch V, Laueremann M, et al. Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs[J]. *Nature photonics*, 2014, 8(5): 375-380.

Optical frequency comb technology for microwave photonics applications

LIU Ya, FANG Xiao, BAI Ming, ZHENG Zheng

School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China

Abstract Optical frequency comb, consisting of many coherent lines spaced with equal frequency separation, is a new type of light source. This paper presents the optical frequency comb generation techniques including electro-optic modulation and nonlinear microresonator, and demonstrates its application and prospects in microwave photonic signal generation, conversion and receiving.

Keywords optical frequency comb; microwave photonics; micro-ring resonator

(编辑 傅雪)