

基于锁相双光梳的多通道下变频技术

姚佳彤¹,李白宇¹,韩达明¹,魏伟^{2*},董毅^{1,2}

(1.上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240;2.北京理工大学 光电学院,北京 100081)

摘要:为实现稳定的宽带下变频,提出一种基于锁相双光梳的多通道宽带下变频方案,实现了将0~11.3GHz内的射频信号分割为5个通道并下变频为频率低于1.2GHz的中频信号。各通道频响平坦均衡,下变频信号最大功率偏差约为1.5dB。光锁相技术保障了下变频通道划分的稳定性,且降低了系统噪声。下变频后的信号在1kHz处相位噪声优于-75dBc/Hz。

关键词:下变频;双光梳;光锁相环

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)04-0046-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-channelization down-conversion technology based on phase-locked dual-optical frequency comb

YAO Jiatong¹, LI Baiyu¹, HAN Daming¹, WEI Wei^{2*}, DONG Yi^{1,2}

(1. State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: For stable broadband down conversion, this paper proposes a multi-channel broadband down-conversion scheme based on phase-locked dual combs. The radio frequency signal from 0~11.3GHz is divided into 5 channels and down-converted to an intermediate frequency signal with a frequency lower than 1.2GHz. The power of each channel is equalized, and the maximum power deviation of the down-converted signal is about 1.5dB. The optical phase-locking technique ensures the stable and accurate division of the down-conversion channels and reduces system noise. The phase noise of the down-converted signal is better than -75dBc/Hz at 1kHz.

Key words: down-conversion; dual-optical frequency comb; optical phase-locked loop(OPLL)

0 引言

随着通信技术的发展,无论是生活中常用的通信导航识别技术,还是现代电子战争中雷达侦察技术,所需处理的信号带宽都在不断增加,载波的频率也在不断提升,而现有方法能处理的信息带宽却十分有限^[1]。因此,将高频射频信号(几十吉赫)进行下变频从而转换为频率较低的中频信号是非常必要的。传统电子技术利用模拟电子器件进行下变频,该方法存在器件体积庞大、带宽范围有限、高损耗和无法应对强干

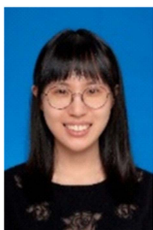
扰的电磁环境等问题^[2],因此已经难以满足日益发展的射频系统的要求。随着光子技术的不断发展,微波光子学成为人们研究的热点,其充分利用光子技术低损耗、尺寸小、宽带和抗干扰等优势来突破微波工程中遇到的电子瓶颈,从而实现采用传统电子技术无法实现的功能^[3]。许多新颖的微波光子方法被用于射频信号的下变频^[4]。然而,大多数方法只能达到窄带下变频,难以满足宽带射频通信系统的要求^[5-8]。利用光频率梳技术可以实现宽带下变频^[9-12],不过其对光梳频率的稳定性有着极高的要求。

本文提出一种基于锁相双梳状结构的下变频方案,射频信号通过调制器调制到信号光频率梳上,然后利用本地光频率梳对宽带射频信号进行下变频。加入外差锁相技术以降低由分离光纤链路和激光器所引入的噪声^[13,14],同时通过光锁相技术确保第一支光梳齿对的频差稳定在固定频率,使通道划分的起始位置

收稿日期:2018-11-03。

作者简介:姚佳彤(1994-),女,硕士研究生,在校期间主要研究微波光子学与光锁相技术,并将光锁相技术应用于宽带信号的下变频处理中。研究生期间曾获校“周维翰”奖学金、校一等奖学金、校“三好学生”,校“优秀毕业生”荣誉称号。

* 通信作者:魏伟(E-mail: weiwei@bit.edu.cn)。



恒定,从而保障系统通道划分的稳定性。

1 原理分析

双光梳下变频实验原理如图1所示。通过强度调制器与相位调制器级联的方式,产生梳齿间隔不同的2路光频梳,分别称为信号光频梳与本振光频梳。 δ_{sig} 与 δ_{lo} 分别表示这2者的梳齿间隔(假设 δ_{lo} 略大于 δ_{sig})。射频信号通过调制器调制到信号光频率梳上。每根信号光频梳齿相当于载波,都承载相同的射频信息。信号光频梳的第一支光梳齿频率为 $f_{\text{sig}}^{(1)}$,本振光频梳的第一支光梳齿频率为 $f_{\text{lo}}^{(1)}$,则第 k 只信号光频梳梳齿在频率域上的表达式为: $f_{\text{sig}}^{(k)}=f_{\text{sig}}^{(1)}+(k-1)\delta_{\text{sig}}$;第 n 只本振光频梳梳齿的频率

表示为: $f_{\text{lo}}^{(k)}=f_{\text{lo}}^{(1)}+(n-1)\delta_{\text{lo}}$ 。利用光锁相技术使信号光频梳的第一支梳齿与本振光频梳的第一支梳齿产生恒定的频率差 f_{Δ} ,则对于第 k 只信号光频梳梳齿与第 k 只本振光频梳梳齿而言,会产生: $f_{\Delta}+(k-1)(\delta_{\text{lo}}-\delta_{\text{sig}})$ 的频率差。2路光梳耦合后,通过周期性滤波滤出不同的本振梳齿和其临近路信号光的射频信息并进行拍频,从而得到下变频后的中频信号。通过该方法可以将一个宽带射频信号的不同频率段以多通道的形式拆解,并针对每个通道范围内的射频信号进行下变频。

为保证通道之间的无缝衔接,每个通道的带宽 Δ_b 应为通道内2个光频梳的频率差:

$$\Delta_b=\delta_{\text{lo}}-\delta_{\text{sig}} \quad (1)$$

则对于每个通道,下变频的范围为 $\left[-\frac{\Delta_b}{2}, \frac{\Delta_b}{2}\right]$ 。

在第 k 个通道内,接收射频信号的频率范围 f_{band} 为:

$$f_{\text{band}}=\left[f_{\Delta}+(k-1)(\delta_{\text{lo}}-\delta_{\text{sig}})-\frac{\Delta_b}{2}, f_{\Delta}+(k-1)(\delta_{\text{lo}}-\delta_{\text{sig}})+\frac{\Delta_b}{2}\right] \quad (2)$$

式(2)表明,保证第一对双光梳齿间的频差为固定频差 f_{Δ} 才可以保证通道的精确和稳定划分。本方案中利

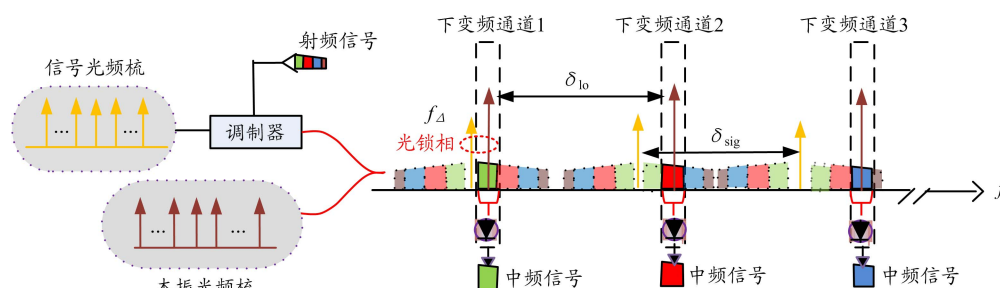


图1 双光梳下变频实验原理图

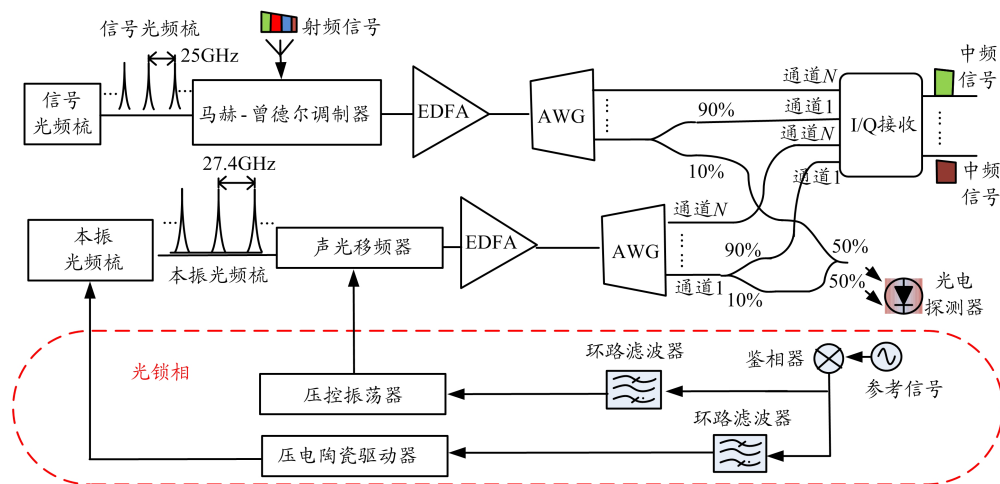


图2 双光梳下变频实验装置

用光锁相技术实现该目标,使信号光和本振光相位恒定,进而射频信号可以稳定地与本振光梳齿拍频得到中频信号。此外,2个光梳的锁定还可以降低由分离光纤链路和激光器所引入的噪声,从而进一步提升下变频信号的质量。

2 实验装置

实验装置如图2所示。由不同微波本振驱动级联的强度调制器和相位调制器产生频率间隔为25GHz的信号光频梳和频率间隔为27.4GHz的本振光频梳,此时通道带宽为2.4GHz。射频信号通过马赫-曾德尔调制器调制到信号光频梳的每一根梳齿上。2路光频梳分别通过掺铒光纤放大器(EDFA)实现光功率的放大,再经由阵列波道光栅(AWG)实现对信号光频梳和本振光频梳的周期性滤波分离。利用外差锁相技术实现对第一支信号光梳齿和第一支本振光梳齿间的频差为固定频差 f_{Δ} 的目的,为各个通道的稳定性划分奠定了基础。在每个通道内,射频信号通过同相/正交(I/Q)接收模块转换为下变频后的中频信号。

光锁相环采用500MHz声光移频器(AOFS)和压电陶瓷(PZT)驱动的双环锁相方法。光电探测

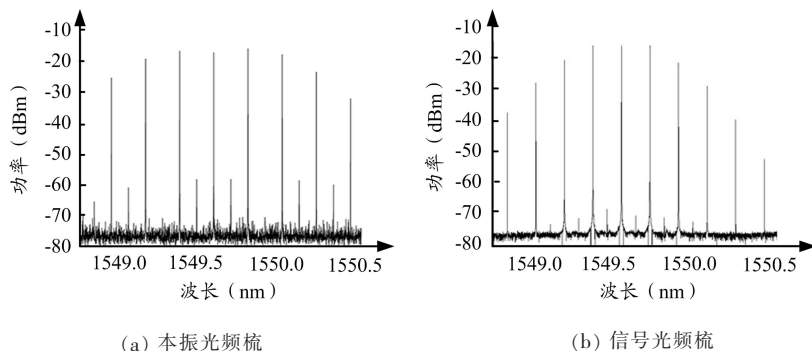


图3 实测光频梳光谱图

器(PD)获得2个光梳中第一支梳齿的拍频信号后,鉴相器检测拍频信号和参考信号的相位误差。随后,该误差信号通过不同的环路滤波器分别进行滤波和整理,该信号一路进入快环用于驱动声光移频器,使声光移频器能够快速跟踪相位抖动,直到频率差锁定在500MHz。另一路进入慢环,通过压电陶瓷控制激光器来跟踪2个梳齿的频率漂移。

3 实验结果

3.1 双光梳锁相结果

图3(a)和图3(b)分别为实测本振光频梳和信号光频梳的光谱图。3dB带宽内梳齿量为5,最大功率偏差为1.2dBm。由式(2)可知,第5通道接收射频信号范围为8.9~11.3GHz,因此在实验中可接收射频信号的最大值为11.3GHz。可通过增加相位调制器的驱动功率产生更多的梳齿,进而拓宽接收射频信号的范围。

为保证2路光梳频率恒定不漂移,我们对2路光梳相差500MHz的第一支梳齿对进行频率锁定。图4是500MHz拍频谱锁相前后的对比图。图中黑线为在第一通道内信号光梳齿与其对应相差500MHz的本振光梳齿锁相后的频谱图,可以看出锁相后环路带宽约为400kHz。蓝线和棕线为当2支光梳齿未锁相时拍频信号频谱图。可以看出由于未进行锁相,激光器产生相对漂移,因此多次测量未锁相的拍频信号频谱图时其中心频率不固定,由式(2)可知此时通道的起始位置也将发生改变,系统的通道划分也就无法稳定进行。通过对比可以看出,通过光锁相确保了第一支梳齿对的频差固定在500MHz,从而保证了系统通道划分的稳定性,为多通道下变频提供实验基础。同时,锁相后拍频谱的相位噪声在环路带宽内得到抑制,意味着通过光锁相技术降低了由分离光纤链路和激光器所引入的噪声。

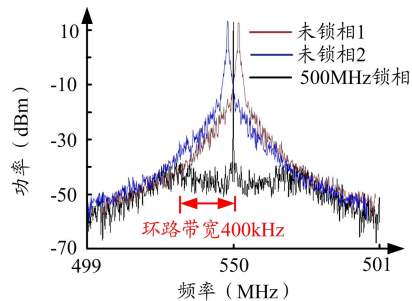
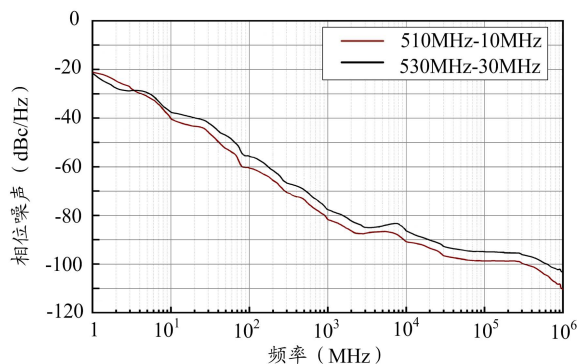


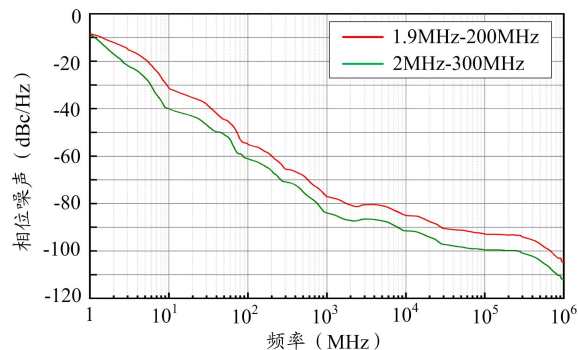
图4 双光梳第一梳齿对拍频信号锁相前后的频谱对比图

3.2 单音信号下变频性能

为测试下变频系统的稳定性,我们进行了单音信号下变频测试。图5(a)为测试通道1内510MHz、530MHz单音信号对应下变频为10MHz和30MHz单音信号的相位噪声图,图5(b)为通道2内1.9GHz、2GHz单音信号对应下变频为200MHz和300MHz单音信号的相位噪声图。可以看出,下变频得到的中频单音信号整体具有较低水平的相噪,且相噪随频率增加呈急速下降趋势。因实验中使用的微波源相噪随信号频率的变化而变化,所以所得的中频信号的相位噪声也会随着原射频信号的频率不同而略有不同。



(a) 通道1内信号下变频相位噪声图



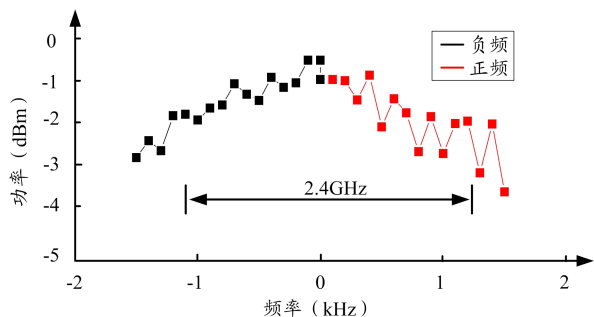
(b) 通道2内信号下变频相位噪声图

图5 下变频信号相位噪声

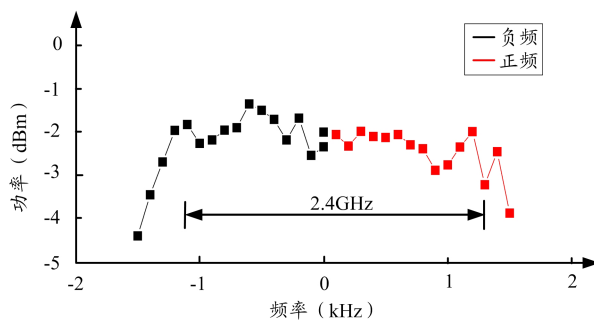
3.3 下变频通带响应

进行宽带信号下变频时, 我们利用下变频信号的功率抖动来描述系统各通道响应的稳定性。理想的通道频率响应是标准的矩形窗形状, 从而保证下变频信号的完整性。此外, 对于传统宽带光混频方式而言, 本振光左右两侧的信号光均会与其进行拍频, 从而互相混叠, 无法区分。本方案通过 I/Q 解调来解决该问题。

通道 3 和通道 4 的下变频通道响应如图 6 所示。在保持输入射频功率不变的情况下, 以 100MHz 为间隔测量通道 3、通道 4 下变频后的信号功率。通道 3 的射频信号范围为 4.1~6.5GHz, 实际测量范围为 3.4~7.2GHz; 通道 4 的射频信号范围为 6.5~8.9GHz, 实际测量为 5.8~9.6GHz。实验结果显示: 下变频通道功率均衡性良好, 接收到的信号最大功率偏差约为 1.5dBm; 对宽带信号的响应基本恒定。正负频两边的衰减程度主要是取决于 PD 的响应带宽。系统对宽带信号响应的稳定性保证了系统对宽带射频信号的无缝接收, 即信息的完整性。



(a) 通道 3



(b) 通道 4

图 6 下变频通道的通带响应

4 结束语

本文提出了基于锁相双光梳的多通道下变频方案。实验演示了 0~11.3GHz 范围内射频信号以 5 通道的模式下变频为频率低于 1.2GHz 的中频信号。通过应用光锁相技术确保了通道划分的稳定性, 同时在

400kHz 环路带宽内明显抑制了 500MHz 拍频谱的相位噪声。下变频后的中频信号在 1kHz 处相位噪声优于 -75dBc/Hz, 具有很好的稳定性。此外, 下变频通带响应平坦, 最大功率偏差约为 1.5dBm, 保证了对宽带信号完整无失真的下变频操作。

参考文献:

- [1] CHANG K. RF and microwave wireless systems [M]. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [2] WIBERG A O J, ESMAN D J, LIU L, et al. Coherent filterless wideband microwave/millimeter-wave channelizer based on broadband parametric mixers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3609–3617.
- [3] ESMAN D J, ATAIE V, KUO B P P, et al. Comb-Assisted Cyclostationary Analysis of Wideband RF Signals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(17): 3705–3712.
- [4] CAPMANY J, MORA J, GASULLA I, et al. Microwave photonic signal processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 571–586.
- [5] WILLIAM S C Chang. RF photonic technology in optical fiber links [M]. Cambs: Cambridge University Press, 2007.
- [6] GOPALAKRISHNAN G K, BURNS W K, BULMER C H. Microwave-optical mixing in LiNbO₃/sub 3/modulators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(12): 2383–2391.
- [7] JUODAWLKIS P W, HARGREAVES J J, YOUNGER R D, et al. Optical down-sampling of wide-band microwave signals [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(12): 3116–3124.
- [8] TANG Z, ZHANG F, PAN S. Photonic microwave downconverter based on an optoelectronic oscillator using a single dual-drive Mach-Zehnder modulator[J]. Optics express, 2014, 22(1): 305–310.
- [9] URICK V J, ROGGE M S, BUCHOLTZ F, et al. The performance of analog photonic links employing highly compressed erbium-doped fiber amplifiers[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2006, 54(7): 3141–3145.
- [10] WILLIAMS K J, ESMAN R D. Optically amplified downconverting link with shot-noise-limited performance [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(1): 148–150.
- [11] XIE X, DAI Y, JI Y, et al. Broadband photonic radio-frequency channelization based on a 39GHz optical frequency comb [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(8): 661–663.
- [12] HAO W, DAI Y, ZHOU Y, et al. Coherent wideband microwave channelizer based on dual optical frequency combs [C]//2016 IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP), Oct. 31–Nov. 3, 2016, Long Beach, USA. Long Beach: IEEE, 2016.
- [13] LI B, XIE W, WEI W, et al. High-Efficiency Broadband Remote RF Signal Down-Conversion Based on Sideband Optical Phase-Locked Loop [C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Sept. 23–27, 2018, Roma, Italy. Roma: IEEE, 2018.
- [14] DING D, XU L, LI Y. Stability, Noise, and Nonlinear Distortion Analysis of a Sampling OPLL [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(13): 2783–2790.