

光纤通信中非线性香农极限的突破 ——光频梳应用及发展趋势

李建平, 李朝晖

暨南大学光子技术研究院, 广州 510632

摘要 受限于光纤克尔非线性效应对传输信号质量的影响, 光纤通信系统的传输速率和容量难以突破非线性香农极限的限制。利用光频梳的相干特性结合数字信号处理技术突破了早期非线性香农极限的传输性能, 有望开启光频梳在下一代光纤通信领域研究的新时代。本文介绍光频梳的定义及产生机制、光频梳在信息通信系统中的最新典型应用、基于光频梳和通信信号处理技术在其他物理科学领域中的交叉应用, 探讨了光频梳技术的未来发展方向。

关键词 光纤通信; 非线性香农极限; 光频梳; 信号处理

随着全球宽带业务的飞速增长, 大容量和高速率已成为通信网络最基本的要求。自诺贝尔奖获得者高锟在 20 世纪 60 年代预测光纤将成为大容量光纤通信的传输介质, Maiman 于 1960 年成功展示了红宝石激光器以来, 光纤通信得到了飞速发展, 传输容量已实现成百上千倍地增加。最近研究表明, 网络数据流量的累计年均增幅已超过 100%; 而随着 5G 无线技术的出现, 预计在 10 年之内, 市场将对 Pbit/s (Petabit, 1 Pbit 相当于 1000 Tbit 或者 100 万 Gbit) 级别的商用光传输系统有迫切需求。

然而, 近年来光通信系统传输容量的增长速度却逐渐缓慢下来, 这主要是由于之前看似无限的光传输带宽已逐步变成稀缺宝贵的资源; 同时, 由于光纤非线性效应的影响, 单根光纤的传输容量受到非线性香农极限的限制, 导致系统传输容量无法按预期的速度增加。

为了应对业务流量的飞速增长需求, 贝尔实验室提出利用多人多出空分复用 MIMO-SDM 技术克服和打破由光纤非线性“香农极限”所规定的容量限

制。2015 年, 贝尔实验室在全球首次演示了 MIMO-SDM 技术进行实时数据传输的实验, 该技术有望把目前 10~20 Tbit/s 的光纤容量提升至 Pbit/s 级^[1]。但尽管如此, 随着空分复用并行信道数目的增加, 光纤克尔非线性效应带来的影响依然无法轻易消除。另一方面, 如何通过新的补偿机制来突破单模光纤非线性香农极限的容量限制, 依然是一个急待解决的关键问题。2015 年, 美国加州大学科学家提出一种基于光频梳的新型技术方案, 可以突破因光纤克尔非线性效应引入的非线性香农极限, 从而大幅提高单模光纤的传输容量, 冲破基于 SMF 的波分复用系统的香农极限传输容量^[2]。

因此, 光频梳——由诺贝尔物理学奖获得者 John L. Hall 和 Theodor W. Hansch 于 2005 年首次提出的新颖技术, 在光通信领域展现出非凡的应用潜力。

1 光频梳及其产生

光频梳即光学频率梳, 是具有确定光频梳齿间隔及频率的光频标尺, 一般

情况下也可简单地说成实现频率梳齿精确锁定的多波长光源。作为一种开创性技术, 光频梳概念简单、实现方案多样, 用以建立一个精确的“频率尺子”。按其基本实现方案来分, 光频梳的产生机制可以包括锁模激光器、超连续谱光源、电光调制光频梳及克尔光频梳等。

1.1 锁模激光器

锁模激光器指利用锁模技术构成的具有稳定输出的多波长激光器, 是最早用来产生光频梳的技术方案。锁模技术就是采用一定的调制方法, 使激光振荡不同频率的各纵模之间有确定的相位关系, 同时各纵模之间相邻频率间隔相等。因此, 锁模激光器产生的多波长分量就是一个光频梳。受限于实现结构和控制系统的复杂, 易于受温度变化影响和光纤材料的漂移损坏, 锁模激光器性能难以得到进一步的提高; 同时, 由于梳齿间隔取决于重复频率及腔内色散所引起的偏置频率, 因而锁模激光器的梳齿间隔很难实现动态可调。

1.2 超连续谱光源

超连续谱光源指利用强短光脉冲

收稿日期: 2016-04-26; 修回日期: 2016-07-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61575082)

作者简介: 李建平, 副研究员, 研究方向为光通信及光频梳技术, 电子信箱: tjpli421@jnu.edu.cn; 李朝晖 (通信作者), 教授, 研究方向为光通信技术、光电检测技术等, 电子信箱: tlzh88@jnu.edu.cn

引用格式: 李建平, 李朝晖. 光纤通信中非线性香农极限的突破——光频梳应用及发展趋势[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 108-111; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.013

通过非线性介质后,由于介质中的自相位调制、交叉相位调制、四波混频和受激拉曼散射等非线性效应和色散的共同作用导致脉冲光谱展宽,使输出光谱产生许多频率成分而形成的一种梳状光源,其各子载波之间的频率间隔由光脉冲的重复频率决定。超连续谱光源可以获得数目巨大的梳齿载波,具有光谱范围宽、稳定性好的优点。

1.3 电光调制光频梳

电光调制光频梳主要指利用电光调制器的电光效应,通过射频驱动信号来调制电光调制器,从而产生频率间隔等于射频驱动信号频率的光频梳。此类光频梳具有梳齿间隔灵活可调的显著优点,在大容量光通信系统中应用最为广泛。从实现方案上来分,电光调制光频梳主要包括深度调制单个相位/强度/偏振调制器、深度调制级联多个相位和/或强度/偏振调制器、循环频移器等。其中,除了循环频移方案外,其他方案相对简单,输出载波稳定性好,子载波的载波噪声比(载噪比)高;但输出数目较少,同时需要大功率的射频放大器。而按采用的频移器种类来分,基于循环频移的光频梳又可细分为基于单边带调制器、多边带调制器及互补频移器3类,其中单边带调制器和互补频移器不需要大功率的射频放大器,并且输出载波稳定;而多边带调制器不仅需要大功率的射频放大器,而且输出稳定性较差。

1.4 克尔光频梳

克尔光频梳主要包括光纤克尔光频梳和微腔克尔光频梳两大类。光纤克尔光频梳主要指利用光纤的克尔非线性效应而产生的具有固定梳齿间隔的光频梳,尤指利用四波混频效应产生的梳状光源,包括单纯的四波混频光频梳、锁模激光器结合自相位调制的四波混频光频梳等。在最新的报道中,也有通过采用锁模激光器级联强度调制器来获得梳齿间隔可调的四波混频光频梳产生。而微腔克尔光频梳主要指结构紧凑、易于集成的基于光学非线性效应的光学微腔光频梳。当强泵浦光进

入光学微腔后,由于光学微腔的场强增强效应,光学微腔内的光强度可以增大很多倍(与外部泵浦光强相比),从而激发克尔效应,并通过四波混频等非线性效应产生新的频率分量。这些频率分量之间的频率差,即光频梳的梳齿间隔,正好等于光学微腔的自由频谱范围,所以新的频率正好也与光学微腔共振。这一共振使得新频率也得到增强,并与原有频率通过四波混频产生更新的共振频率。如此反复,以产生更多梳齿数目的光频梳。从目前发展来看,微腔克尔光频梳因其易于集成的优势正得到越来越广泛的研究。

2 信息通信中的光频梳

在现代信息通信系统中,光频梳主要作为具有固定频率间隔的多波长相干光源,用以构建超大容量光通信系统,或者微弱信息精确提取系统等。下面通过几个典型工作介绍光频梳在信息通信系统中的应用特点。

2.1 基于光频梳的极限超级信道光纤通信机制

长久以来,光纤克尔非线性效应引入的非线性信号损伤,因其复杂的损伤机制未能找到一种行之有效的补偿方法以突破非线性香农极限,制约了单模光纤通信系统传输容量的提升。2015年,美国加州大学科学家提出一种新型技术方案,即利用光频梳作为相干多载波光源构成超级信道传输系统,同时结合先进数字信号处理技术,可以有效突破光纤克尔非线性效应带来的非线性香农极限限制^[2]。这种新型超级信道传输系统的核心就是基于载波之间的相干特点,通过在发射端采用数字预衰减技术,在电域对传输信号遭受到的光纤线性和非线性损伤进行预补偿,并在接收端对残余信号进行后补偿。与传统的基于非相干多波长光源的波分复用系统传输性能相比,该系统可以避免光子载波之间的非相干走离,同时降低相位噪声的影响,大幅提升光纤克尔非线性信号损伤的补偿性能。而随着入纤功率的提高,很大程度上增加了单模

光纤的传输容量,改善了系统性能。因此,该机制可以冲破基于单模光纤的非线性香农极限,增加单模光纤的传输容量和传输距离。美国光学学会《Optics & Photonics News》对这一最新研究成果进行了专题报道,充分展示了光频梳在光纤通信系统中的独特魅力^[3]。

2.2 基于光频梳的片上超级信道光互连机制

在早期的超级信道光纤通信系统中,光频梳一般是用分立的器件或者集成度不高的光子芯片来实现。考虑到下一代光互连通信系统的发展趋势,采用具有高集成度的片上集成技术是主要手段。2014年,德国科学家和瑞士科学家(包括由诺贝尔物理学奖获得者Theodor W. Hansch创建的Menlo Systems GmbH公司)联合研制一套片上集成太比特级超级信道光纤通信系统^[4]。该系统的核心技术之一是研制了一种具有低相位噪声的片上集成微腔克尔光频梳,因其极高的频谱纯度可以实现高级调制技术的相干数据传输。同时,通过采用正交4相位调制(QPSK)和多正交幅度调制(16QAM)等高级调制技术,极大地提升传输系统的频谱效率,达到了6 bit/(s·Hz)。该系统最终在一套集成平台上实验实现了1.44 Tbit/s 传输距离300 km的太比特数据传输,验证了片上集成微腔克尔光频梳在太比特光纤通信系统尤其是下一代片上集成光互连系统中的应用前景。

2.3 基于光频梳的单一随机事件探测机制

随机、非重复现象的事件观察或探测在天文学、光谱学、生物学和遥感等领域至关重要。而如何通过隐藏或淹没在噪声里的微弱信号来获取有用信息,对现有的基本探测机制提出了挑战。不同于重复信息可以通过平均操作来消除噪声的影响,一个单一随机事件却无法通过平均从噪声中分离出来。2015年,美国加州大学科学家提出一种利用两个可调谐光频梳多载波光源来实现单一随机事件探测的新机

制,其核心在于由这两个光频梳构成的频谱克隆接收机和单步相干光场处理器^[5],在不需平均操作的情况下,即可在噪声背景中完成对快速变化的、随机发生的单一事件的有效探测。实验演示了在有噪声的情况下,利用频谱克隆接收机可以对一个孤立的 80 ps 冲实现置信度超过 99% 的精确探测。因此,这种基于光频梳的单一随机事件探测新机制具备精确提取快速、随机的单一事件的显著优势,从而可以在多个科学领域发挥出重要作用;同时,新型频谱克隆接收机有可能在目前被认为安全的通信网络中截取相关信息,因而对现代信息网络的安全带来了新的挑战。

3 物理科学中的光频梳

实际上,光频梳在信息与通信领域中的应用历史还不算很长,其最初的发展动机是为了光学时钟与其他射频(RF)标准或时钟进行对比,以改善时频测量的精度。然而,随着时代的发展和科学技术的进步,光频梳已在多个领域取得了优异成绩,可以在 10^{-19} 或更低的分数不确定性量级进行对比验证,使得测量性能仅受限于实验装置本身的热收缩或膨胀引入的多普勒频移效应^[6]。因此,光频梳的应用领域非常广泛。光频梳在光学时钟方面的应用已是相当成熟,但在一些其他领域的应用尚处于探索阶段。在不同的应用领域,对所需光频梳的重要性能要求,包括频率精度、准确度、鲁棒性、简单性、频谱覆盖范围和梳齿数量。例如,光学时钟就只需使用几个近光学时钟频率的梳齿。然而,分子光谱学则需要使用更多的梳齿以覆盖那些在兴趣范围内的分子光谱线;对于任意光/射频波形产生则需要使用所有光频梳的梳齿^[6]。下面主要介绍几个典型的光频梳应用场景,这些应用都与信息通信中的相关基础技术有密切联系。

3.1 射频光子学

光谱纯度是表征一个射频振荡器基本性能特征的关键参量。而以飞秒

激光为基础的射频信号发生器在光谱纯度改进方面已获得了惊人的突破。不同于传统尺寸较大的实验用的光频梳,微腔克尔光频梳可以实现片上集成芯片级水平的同时,保持光频梳产生高光谱纯度的射频光子振荡器的优势。2015年,美国科学家报道了利用集成非线性微腔克尔光频梳来构建高光谱纯度的射频信号振荡器的新方法^[7]。在这项工作中,射频光子振荡器的振荡频率为 10 GHz,而相位噪声性能为 <-60 dBc/Hz@10 Hz、 <-90 dBc/Hz@100 Hz 和 <-170 dBc/Hz@10 MHz。同时,在具有相同集成尺寸的情况下,该器件的频率稳定度要明显优于的现有射频光子器件,充分显示了光频梳的优势。

3.2 天文观测

为发现和描述太阳系外的行星特征,需要采用的关键测量技术是依赖于轨道行星对宿主行星所引入的光谱微弱多普勒频移的测量。引入光频梳作为频率参考是最近天文观测中对行星特征研究的新进展。频率梳产生一系列间隔的参考频率,这些频率分量提供极高的精度和频谱准确度,使得观测系外行星的检测手段具有潜在的革命性突破。最近,美国科学家使用基于电光调制的激光频率梳来实现行星径向速度天文测量的新机制^[8]。不同于传统的锁模光频梳,该光频梳的中心波长被稳定于一个分子或原子基准的参考波长,并且梳齿间隔很容易地利用现有典型的天文光栅摄谱仪进行分解探测。基于现成的商用组件,科学家构建了在近红外波段操作相对简单和可靠的径向速度天文测量仪器样机,并利用美国航空航天局红外望远镜和凯克-II 望远镜进行了实验验证。实验结果证实了光频梳在天文观测中的重要意义。

3.3 物质特性的精密测量

在光学传感器以及许多其他应用方面,光谱测量是至关重要的物质属性测量手段。但普遍的方法,如光学频谱分析和可调谐激光光谱学,常常难以在分辨率、速度和准确度方面追求极致。

虽然光频梳已被广泛用于离散原子和分子谱线计量、天文观测、信息通信等方面,但普通光学方法产生的光频梳具有较大的梳齿间距,这限制了其用于连续光谱直接取样的分辨率。为了克服这些问题,中国科研人员提出了一种以数字方式生成的超精细光学频率梳作为频率标尺进行光谱精密测量的新机制^[9]。频谱中的每条谱线提供一个采样点,利用相干检测技术可在同一时间捕获所有谱线的信息。科研人员搭建了一套基于马赫-曾德尔干涉仪的折射率传感器,并利用快速傅立叶逆变换,在 10 GHz 频谱范围内产生一个梳齿间隔为 1.46 MHz 的数字可调光频梳,用以验证新机制的精密测量功能。实验结果显示,利用该数字可调光频梳,可以实现频谱分辨率为 0.01 pm、响应时间为 0.7 μ s 的精确测量。该结果显示了优于现有测量手段 100 倍的分辨率和响应时间,同时还有进一步增强的潜力。因此,这种光频梳可以应用于对分辨率和响应速度有同时要求的新型免标记传感器方面,如结合动力学和单分子动力学测量等。

4 光频梳发展趋势

不断拓展的无数应用领域对光频梳的性能提出了越来越多的要求,包括低相位噪声、高重复率、高功率、宽光谱覆盖范围,最重要的是需要具备实现方案简单、鲁棒性强、尺寸小,环境稳定的模式锁定、相位锁定和易于监测等。虽然基于光纤的光频梳比基于钛宝石的光频梳具有一定的优势,尤其是可以连续工作多年,但目前只存在于实验室的演示系统当中^[6]。因而,对于高性能光频梳的基本产生机制研究仍然是前沿研究领域,尤其是最近基于片上集成微腔光频梳的研究。相信与任何科学技术一样,随着科学技术的进步和发展,高性能光频梳未来必将在更多领域展示其独特魅力,开拓出光频梳应用新时代。

参考文献 (References)

- [1] Randel S, Corteselli S, Badini D, et al. First real-time coherent MIMO-DSP for six coupled mode transmission [C]//Proceedings of IEEE Photonics Conference (IPC). Virginia, USA: IEEE, 2015: 1-2.
- [2] Temprana E, Myslivets E, Kuo B, et al. Overcoming Kerr-induced capacity limit in optical fiber transmission [J]. Science, 2015, 348(6242): 1445-1448.
- [3] Temprana E, Alic N, Kuo B, et al. Beating the nonlinear capacity limit [J]. Optics & Photonics News, 2016, 27(3): 30-37.
- [4] Pfeifle J, Brasch V, Lauermaun M, et al. Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs [J]. Nature Photonics, 2014, 8: 375-380.
- [5] Ataie V, Esman D, Kuo B, et al. Subnoise detection of a fast random event [J]. Science, 2015, 350(6266): 1343-1346.
- [6] Newbury N. Searching for applications with a fine-tooth comb [J]. Nature Photonics, 2011, 5(4): 186-188.
- [7] Liang W, Eliyahu D, Ilchenko V, et al. High spectral purity Kerr frequency comb radio frequency photonic oscillator [J]. Nature Communications, 2015, 6(7957): 1-8.
- [8] Yi X, Vahala K, Li J, et al. Demonstration of a near-IR line-referenced electro-optical laser frequency comb for precision radial velocity measurements in astronomy [J]. Nature Communications, 2015, 7(10436): 1-9.
- [9] Bao Y, Yi X, Li Z, et al. A digitally generated ultrafine optical frequency comb for spectral measurements with 0.01 pm resolution and 0.7 [micro]s response time [J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(e300): 1-7.

Breakthrough of nonlinear Shannon limit in optical fiber communication systems: Applications and trends of optical frequency comb

LI Jianping, LI Zhaohui

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract The quality of transmitted signal is easy to be impacted due to the fiber Kerr nonlinearity, which results in the difficulty in increasing transmission capacity and speed of single mode fiber (SMF) based optical fiber communication systems. However, a new research by University of California at San Diego (UCSD) has shown that the technology based on optical frequency comb (OFC) combined with digital signal processing can improve the transmission performance significantly. This manifests that this OFC-based technology can be treated as a breakthrough of the nonlinear Shannon limit. This paper mainly relates to the topic of OFC, including the definition, generation methods, typical applications in information and communication systems, and the OFC-based crossed applications in other related physical scientific fields. Meanwhile, the trends of OFC technology have also been discussed.

Keywords optical fiber communication; nonlinear Shannon limit; optical frequency comb; signal processing

(责任编辑 刘志远)