

参量光频梳谱线线宽特征理论与实验研究

曹 庭, 闫娟娟, 陈 静, 梁爱虎

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 通过电光强度和相位调制激光器输出的连续波产生泵浦脉冲, 利用单模光纤进行脉冲压缩整形后, 激发高非线性光纤中的参量过程实现光谱拓展, 产生参量光频梳(Optical Frequency Comb)。在此基础上研究参量光频梳谱线线宽的分布特征。通过分析电光调制后产生的初始光频梳的相位与载波激光和射频信号相位的关系, 结合参量过程原理推导了新产生的谱线分量的相位与两条泵浦谱线相位间的关系, 从而得出谱线线宽的分布特征。以线宽 4.14MHz 和 64.8kHz 的两种激光器为载波光源进行实验, 分别产生了包含 40 条和 60 条谱线的参量光频梳, 通过采用延时自外差法(DSHI)测量不同阶谱线的线宽, 验证了理论分析结果的正确性。

关键词: 光学频率梳; 电光调制; 相位噪声; 参量过程; 线宽

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)05-0010-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.05.003

Theoretical and experimental research on spectral linewidth characteristics of parametric optical frequency comb

CAO Ting, YAN Juanjuan, CHEN Jing, LIANG Aihu

(School of electronic and information engineering,
Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The pump pulses are shaped and compressed with a section of single mode fiber (SMF). Parametric optical frequency combs are generated by using the electro-optical intensity and phase modulated continuous-wave laser to produce pump pulses and stimulate parametric process in a highly nonlinear fiber. Spectral linewidth distribution of the generated parametric comb lines are investigated. The relationship between the phase of initial comb lines produced by electro-optical modulation and those of the carrier laser and radio frequency (RF) signal is analyzed. According to the principle of parametric process, the relationship between the phase of the new generated and the seeding frequency lines is derived, and the of the linewidth distribution are obtained. In the experiments, combs with about 40 and 60 lines are obtained by using two carrier lasers with a linewidth of 4.14MHz and 64.8kHz respectively. The linewidth of the tones with different orders is measured by the method of delayed self-heterodyne interferometer (DSHI). The results also confirm the conclusion drawn from the theoretical analysis.

Key words: optical frequency comb; electro-optical modulation; phase noise; parametric processes; linewidth

0 引言

光学频率梳 (Optical Frequency Comb) 简称光频梳, 已被认为是当前光学领域最重要的创新之一, 在高精度测量、高能辐射与遥感, 以及光通信等领域都

收稿日期: 2018-01-11。

基金项目: 国家自然科学基金(61771029, 61201155)资助。

作者简介: 曹庭(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电信息处理方面。

有着广泛的应用^[1]。其中, 波分复用及光学任意波形的产生等应用都对光频梳、平坦度、带宽和稳定性都提出了较高的要求^[2]。

光频梳最早通过锁模激光器产生^[3], 但这种方法产生的光频梳的谱线间隔不可调, 且稳定性较差。近年来, 许多产生光频梳的新方法不断被提出^[4]。在这些方案中, 基于连续波电光调制的方法由于具有结构简

单、稳定性高^[5]和可调节性好的优点而被广泛关注与研究。其中,最常用的方法是通过射频信号源驱动级联的强度调制器(IM)和相位调制器(PM),通过触发高级调制边带而生成光频梳。研究发现,采用这种方法产生的光频梳的谱线数量由相位调制器的调制深度决定^[6],然而,由于射频放大器输出功率的限制很难进一步提高调制深度。光频梳的产生也可以通过参量过程来实现,即用两束激光作为泵浦,激发高非线性光纤(HNLF)中的参量过程,产生多条新的谱线分量。基于这种方法,可产生 10dB 带宽、140nm 的光频梳^[7]。为了提高参量光频梳谱线的稳定性,需通过注入锁定技术使用于激发参量过程的两束泵浦光相位相干^[8]。在这种方法中,为了实现泵浦激光的注入锁定,需要两个分布反馈式从激光器,因而增加了光频梳发生器的复杂度。本文在没有使用注入锁定技术的情况下,以电光调制后的激光作为泵浦产生参量光频梳,并对参量光频梳的谱线线宽分布特征进行研究。

1 参量光频梳的基本原理

本文研究的参量光频梳发生器的工作原理如图 1 所示。半导体激光器输出的连续波(CW)依次通过一个强度调制器和一个相位调制器,频率为 f_m 的射频信号驱动两个调制器,对连续光分别进行强度和相位调制。正交偏置的强度调制器工作于线性区,产生重复频率为 f_m 的光脉冲。相位调制器和单模光纤(SMF)构成脉冲压缩单元,强度调制器输出的光脉冲经相位调制后产生啁啾,再通过单模光纤传输后,由于光纤色散的作用,发生脉冲压缩,其峰值功率变大,从而有助于提高高非线性光纤中参量混频过程的效率,产生更多新的谱线分量。此时,相位调制器的输出可表示为:

$$e_{\text{OFC}}(t) = E_0 \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \{J_m(\alpha+\beta)\exp(j\theta) + J_m(-\alpha+\beta)\} \times \exp\{j[(\omega_0 + m\omega_{\text{RF}})t + \phi_{\text{laser}}(t) + m\phi_{\text{RF}}(t)]\} \quad (1)$$

其中 $E_0 \exp(j\omega_0 t)$ 为 CW 激光器的输出光场, ω_0 为角频率, $\phi_{\text{laser}}(t)$ 和 $\phi_{\text{RF}}(t)$ 分别为激光器和射频信号的相位噪声, J_m 为 m 阶第一类贝塞尔函数, α 和 β 分别为强度调制器和相位调制器的调制深度。由式(1)可知,级联电光调制产生的光频梳的第 m 阶谱线的相位噪声 $\phi_{\text{OFC}_m}(t)$ 可以表示为:

$$\phi_{\text{OFC}_m}(t) = m\phi_{\text{RF}}(t) + \phi_{\text{laser}}(t) \quad (2)$$

图 1 中,强度调制器输出的光脉冲经相位调制后,

具有随射频调制信号变化的啁啾,这些脉冲经过一段单模光纤传输后,脉冲啁啾与光纤色散相互作用使脉冲发生压缩,被压缩的脉冲进入高非线性光纤进行参量混频。

石英光纤中发生的参量过程涉及 4 个光波的相互作用,其中在满足相位匹配的条件下,光纤中会发生显著的简并四波混频(FWM)效应。当两个不同频率的信号波在高非线性光纤中传播时,将会作为泵浦波产生新频率的光波。如果泵浦功率足够大,将使得新产生的频率分量作为泵浦发生二阶四波混频过程。利用这种级联的四波混频效应即可产生更高阶的频率分量^[9],从而实现光谱的拓展,产生宽带参量光频梳。高阶四波混频产生的频率分量的相位满足如下关系^[10]:

$$\theta_{a_{N,S,N}} = (N+1)\theta_{P_1,P_2} - N\theta_{P_3,P_4} \quad (3)$$

其中 $\theta_{a_{N,S,N}}$ 分别表示 N 阶四波混频产生的较高频和较低频的谱线相位, θ_{P_1,P_2} 则表示两条泵浦谱线的相位。图 1 中,利用电光调制产生的光频梳作为泵浦进行参量混频,因此 θ_{P_1,P_2} 即表示此初始光频梳中两条谱线的相位。当泵浦谱线分别为第 m 阶和 n 阶谱线分量时,根据式(2),可得到这两条谱线间的相位满足如下关系:

$$\theta_m = \theta_n + (m-n)\phi_{\text{RF}} \quad (4)$$

当这两条谱线作为参量过程的泵浦时,结合式(3)和(4),可以得到:

$$\theta_N = \phi_{\text{laser}} + [(N+1)n - Nm]\phi_{\text{RF}} \quad (5)$$

其中 θ_N 是第 N 阶四波混频产生的频率分量的相位。由式(5)可知,当连续波激光器的相位噪声远大于射频驱动信号的相位噪声,即载波激光线宽较大,远大于射频调制信号的线宽时,新产生谱线的相位取决于载波激光的相位,可以认为新产生的谱线分量与载波激光具有一定的相干性;而当激光器线宽很窄,与射频信号线宽相当时,则无法忽略射频信号相位的影响,此时新产生谱线的相位噪声将随其阶数的升高而增大,与载波激光间的相干性随之降低。

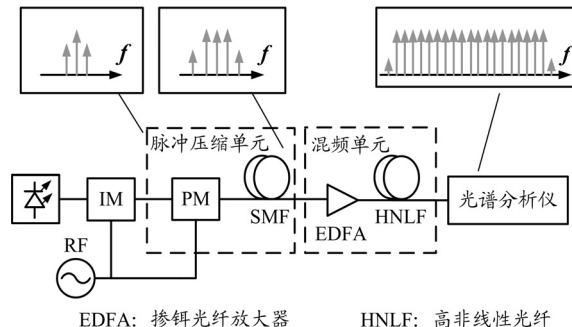


图 1 参量光频梳发生器的工作原理

2 实验装置与实验结果

根据上述理论模型, 本文搭建了如图 2 所示的实验系统。实验系统分为两大部分: 第一部分原理如上所述, 强度调制后产生的光脉冲经过压缩单元和混频单元分别进行脉冲压缩和参量混频, 产生宽带光频梳; 第二部分采用延迟自相干 (Delay Self Heterodyne Interference, DSHI) 法对不同谱线分量的线宽进行测量, 以研究不同阶谱线的相位噪声特性。实验中, 连续波激光器的工作波长为 1550.12nm, 射频调制信号的振荡频率为 10GHz, 强度调制连续波激光产生的光脉冲, 经相位调制后产生啁啾。这些啁啾脉冲通过 4km 的单模光纤, 利用光纤色散与脉冲啁啾的共同作用, 使脉冲发生压缩, 其峰值功率增大, 从而提高参量混频的效率。同时, 为了进一步增大这种非线性效应, 采用一个掺铒光纤放大器 (EDFA) 对单模光纤的输出信号进行放大。

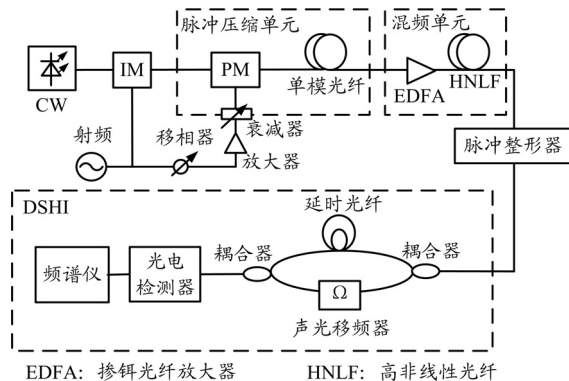


图 2 实验装置图

实验中所用高非线性光纤的非线性系数为 $17\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$, 长度为 300m, 放大后耦合进入高非线性光纤的光功率为 27dBm。此时, 高非线性光纤的输出光谱如图 3 所示。在 10dB 功率波动范围内, 实验得到了包含 40 条谱线的光频梳。

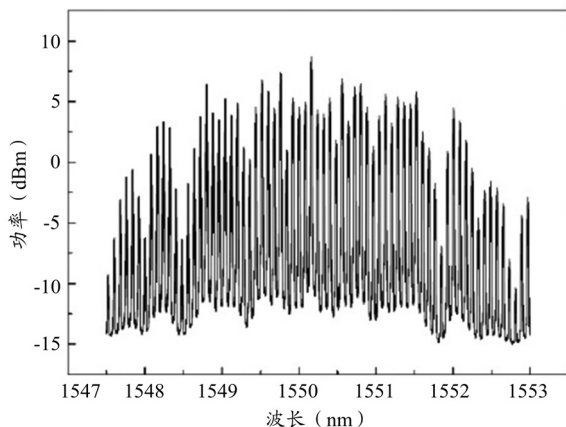


图 3 HNLf 的输出光谱

为了测量所生成的参量光频梳中每条谱线的线宽, 实验中采用脉冲整形器 (Finisar Wave Shaper 1000S) 作为可调光带通滤波器, 分别滤出其中的一条谱线 (如图 4 所示), 并采用延迟自相干法对其线宽进

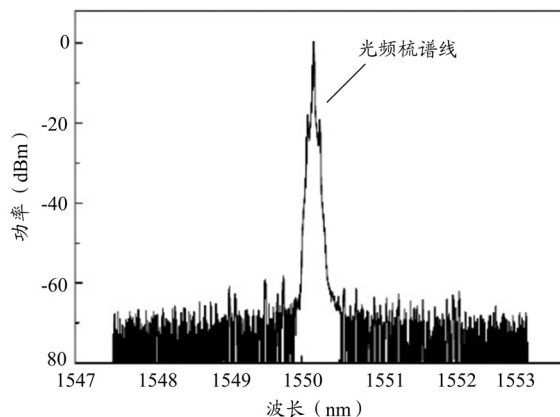


图 4 由脉冲整形器滤出的参量光频梳及光频梳谱线

行测量。具体而言, 将待测谱线经 50:50 耦合器分为两路进入两干涉臂, 其中一臂为参考臂, 利用光纤延迟线对待测光进行延迟; 另一臂为信号臂, 利用声光频移器对待测光进行频移。频移后的信号光与参考光耦合后送入光电检测器进行光电变换, 两束光发生拍频。利用电的频谱分析仪对得到的拍频信号的 3dB 带宽进行测量, 即得到待测谱线的宽度。实验中, 声光频移器产生的频移量为 55MHz, 光电检测器的带宽为 1GHz。为保证测量误差低于 2%, 所用延迟线的长度须大于载波激光相干长度的 3 倍, 对于线宽为 20kHz 的激光器, 要求延迟线长度不小于 8~9km^[11]。本实验中延迟线的长度为 10km, 所用载波激光器线宽均大于 20kHz, 因此可保证测量误差低于 2%。我们采用这种延迟自相干方法, 分别测量了载波 ± 5 阶、 ± 10 阶、 ± 15 阶和 ± 20 阶谱线的线宽大小, 其中测得的载波线宽为 4.14MHz, 其它阶谱线的线宽相对于载波线宽之间的变化如图 5 所示。

由图 5 可见, 与载波线宽相比, 不同阶的谱线的线宽变化较小, 不超过 0.34MHz, 这是由于所用载波线宽较大 (4.14MHz), 而射频调制信号的线宽较小, 不超过 10kHz^[12]。由式 (5) 可知, 即使是高阶四波混频所产生的谱线, 其线宽主要取决于载波线宽, 而射频信号线宽的影响可以忽略。因此, 在这种情况下, 不同阶谱线的线宽相对于载波激光的线宽变化较小。

我们采用上述类似的实验装置和方法, 将 CW 激光器替换为线宽大小为 64.8kHz 的窄线宽的激光器, 产生了 10dB 带宽内包含 60 条谱线的光频梳, 经对其

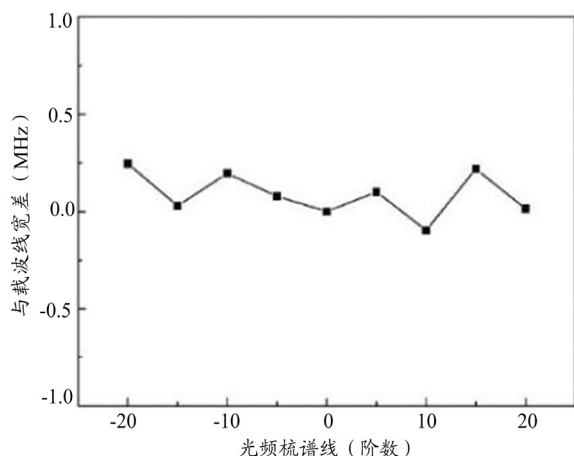


图5 载波光源为线宽为 4.14MHz 时激光器得到的光频梳谱线线宽分布

不同阶谱线的线宽进行测量,得到了如图6所示的线宽分布结果。当谱线阶数较低时(阶数低于15时),与载波相比,不同阶谱线的线宽变化较小;当谱线阶数进一步增大时(阶数高于20时),阶数越高,其线宽急剧变大。这种情况同样可由式(5)进行解释。由于载波线宽与射频信号线宽相差不大,后者对谱线线宽的影响不能忽略,并且高阶四波混频产生的高阶谱线的线宽受射频信号线宽的影响更大。因此,谱线阶数较大时,其谱线线宽会发生急剧增大。

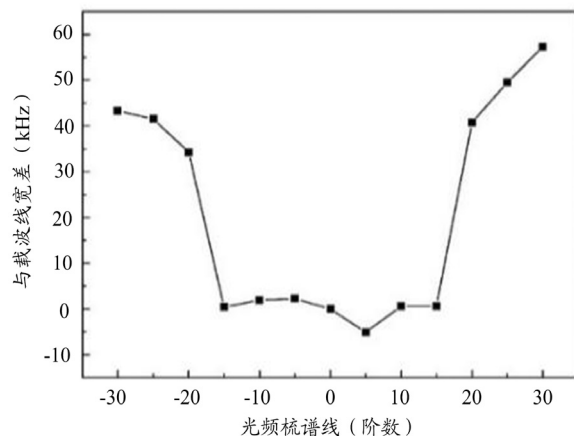


图6 载波光源为线宽为 64.8kHz 时激光器得到的光频梳谱线线宽分布

3 结束语

以电光调制产生的光频梳作为泵浦,激发HNLF中的四波混频效应可产生宽带的参量光频梳。本文理论分析了这种光频梳不同谱线线宽的分布特征,并进行了实验验证。理论和实验结果都表明:当所用载波激光线宽为兆赫兹量级时,射频调制信号线宽的影响

可以忽略,与载波激光线宽相比,参量光频梳中不同阶谱线的线宽变化不大;当载波激光线宽为几十千赫兹时,射频信号线宽的影响不能忽略,此时参量光频梳中谱线阶数越高,其线宽相对于载波线宽的变化越大。

参考文献:

- [1] HILLERKUSS D, SCHMOGROW R, SCHTELLINGER T, et al. 26 Tbit/s line-rate super-channel transmission utilizing all-optical fast fourier transform processing [J]. Nature Photonics, 2011, 5(6): 364–371.
- [2] MORIOKA T, MORI K, SARUWATERI M. More than 100-wavelength-channel picosecond optical pulse generation from single laser source using supercontinuum in optical fibres [J]. Electronics Letter, 1993, 29(10): 862–864.
- [3] BARTELS A, HEINECKE D, DIDDAMS S A. Passively mode-locked 10 GHz femtosecond Ti: sapphire laser [J]. Optics Letter, 2008, 33(16): 1905–1907.
- [4] WU R, TORRES V, DANIEL E, et al. Supercontinuum-based 10-GHz flat-topped optical frequency comb generation [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6045–6052.
- [5] WU R, DANIEL E L, ANDREW M W. 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.
- [6] YAN J, PENG Y C, ZHENG Z. Generation of optical frequency combs based on time-to-frequency conversion [J]. IET Optoelectronics, 2014, 8(3): 149–153.
- [7] BILL P K, MYSLIVETS E, ALIC N, et al. Wavelength multicasting via frequency comb generation in a bandwidth-enhanced fiber optical parametric mixer [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(23): 3515–3522.
- [8] ANDREAS O J, MYSLIVETS E, RADIC S, et al. Spectral linewidth preservation in parametric frequency combs seeded by dual pumps [J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17610–17619.
- [9] BRES C S, ANDREAS O J, BILL P K, et al. Optical demultiplexing of 320 Gb/s to 8 40Gb/s in single parametric gate [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 434–442.
- [10] HORAK P, LOH H. On the delayed self-heterodyne interferometric technique for determining the linewidth of fiber lasers [J]. Optics Express, 2006, 14(9): 3923–3928.
- [11] SHI H X, WU T. Basic requirements of the delayed self-heterodyne spectrometer [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1997, 2(3): 34–46.
- [12] GUENNEC Y L, MAURY G. Performance of interferometric systems for optical processing of microwave signals: Influence of laser- and microwave-phase noises [J]. Photonics Technology Letters, 2004, 16(9): 2120–2122.