

利用游标效应提高微波光子学扫描式频率测量效率

于 梦,张 勇,靳辰飞,刘丽萍,赵 远

(哈尔滨工业大学 物理系,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 受激布里渊散射效应被广泛用于微波光子学频率测量中,然而该效应的测频系统存在扫描时间长、响应速度慢的问题,为了提高该系统的扫描效率,提出了基于频率梳泵浦和游标效应的改进方案。阐述了此方案的测频原理和改进机制,并进行了理论分析和仿真验证。改进后的系统在频率测量精度 100 MHz、系统带宽 50 GHz 时,扫描次数降低为原来的 7%,在相同精度和扫描次数下,带宽更大,表明新方案的系统性能得到了大幅提升。

关键词: 微波光子学; 频率测量; 受激布里渊散射; 游标效应

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1117004

Improving the efficiency of microwave photonics scanning frequency measurement based on vernier effect

Yu Meng, Zhang Yong, Jin Chenfei, Liu Liping, Zhao Yuan

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Stimulated Brillouin scattering is widely used in microwave photonics frequency measurement, however systems based on stimulated Brillouin scattering have long scanning period and low response speed. To improve the scan efficiency, an improved scheme using frequency combs pump and vernier effect was studied. The improved system was analyzed and simulated, and the scanning number was reduced to 7% of the original result under 100 MHz precision and 50 GHz bandwidth. Moreover, when the precision and scanning number are fixed, the improved system has a greater bandwidth which indicates that the property of the system is greatly enhanced.

Key words: microwave photonics; frequency measurement; stimulated Brillouin scattering; vernier effect

收稿日期:2016-03-05; 修订日期:2016-04-15

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61108072)

作者简介:于梦(1993-),男,硕士生,主要从事微波光子学方面的研究。Email:hit_yumeng@163.com

导师简介:刘丽萍(1963-),女,副教授,硕士生导师,主要从事光电探测、激光雷达、光学系统设计等方面的研究。

Email:hit_liuliping@hit.edu.cn

赵远(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事微弱信号光电检测、激光雷达研究。

Email:zhaoyuan@hit.edu.cn

0 引言

电子战中,为了实现信息的快速拦截和预警,大带宽、快速的频率测量技术具有重要的意义^[1]。现有的频率测量技术多采用电子学方法,由于电子器件本身固有的带宽限制,利用电子器件很难实现性能均一的超宽带频率测量。同时,电子器件的使用使接收机体积、重量和功耗都非常大。另外电子学器件非常容易受到电磁干扰,在敌方干扰信号的作用下性能将受到很大影响。

微波光子学作为一门结合了电子学与光学的新兴学科,具有超带宽、体积小、免疫电磁干扰等优点,可以突破电子学固有的带宽瓶颈,因此得到了人们的广泛关注和肯定^[2]。利用微波光子学手段实现微波频率测量,可以极大扩展和增强现有微波测频系统的功能和性能。目前常用的微波光子学测频方法主要分为以下三类:信道法^[3-4]、功率映射法^[5-6]以及扫频法^[7-9]。信道法的主要优点是实时快速,但是测频精度取决于信道数,系统复杂且难以实现高精度频率测量。功率映射法系统较为简单,但是测频精度在整个带宽内不均一。扫频法利用光纤法珀腔、可调光栅、受激布里渊散射效应(SBS)等可以实现对具有多个频率成分信号的测量,但是扫描次数多,效率低,并且扫描时间随着系统工作带宽的增加线性增加。

针对基于 SBS 的扫描式频率测量系统扫描效率低的问题,文中设计了利用频率梳泵浦和游标效应^[10]提高扫描效率的方案。理论分析和仿真模拟表明,相比于传统 SBS 扫频式频率测量方法,基于游标效应的改进方案可以有效减少系统的扫描次数,提高系统的扫描效率,该方案尚未见报道。

1 SBS 扫描式测频的基本原理

传统的基于 SBS 的扫描式频率测量系统如图 1 所示^[9],由分布反馈式(DFB)激光器发出的频率为 f_c 的单色光被分为上下两路,上路作为信号光,下路作为泵浦光。泵浦光经过光纤放大器(EDFA)后经过循环器进入单模光纤对信号光进行反向泵浦,在 $f_c - f_{SBS}$ 频率附近产生一个带宽约为 20 MHz 的 SBS 增益峰,其中 f_{SBS} 为 SBS 频移,在单模光纤中为一个接近 11 GHz 的常量。上路激光经过电光调制器(EOM)被

频率为 f_s 的待测信号进行载波抑制单边带调制,产生 $f_c + f_s$ 的上边带信号,该上边带信号经过一个光开

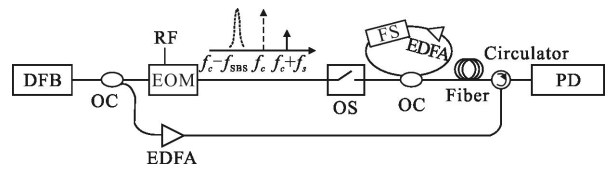


图 1 基于 SBS 的频率测量系统图

Fig.1 Scheme of frequency measurement system based on SBS

关后进入一个由频移器(FS)、光纤放大器和耦合器(OC)组成的循环频移系统,之后进入单模光纤,最后被探测器(PD)检测。光开关由一个矩形脉冲驱动,以保证光波长与循环频移环长度大致相等。上边带信号每经过一次循环频移系统,频率减小一次,假设由频移器决定的频移量为 Δf ,则单边带信号经过 N 次循环后的频率为:

$$f = f_c + f_s - n\Delta f \quad (1)$$

当 f 落在 $f_c - f_{SBS}$ 附近的 SBS 增益区时,信号被放大,探测器可以探测到一个光强脉冲。通过对光强脉冲信号的到达时间测量可以确定循环次数 n ,由此可以测得微波信号的频率为:

$$f_s = n\Delta f - f_{SBS} \quad (2)$$

由于测得的信号频率为一系列间隔为 Δf 的离散值,因此测频精度即为 Δf 。

另外值得注意的是由于 SBS 增益区很窄,当 Δf 较大时,在频移过程中可能出现信号错过增益区而探测不到信号的情况,因此在参考文献[8]中利用一个额外的调制器对光源进行相位调制使光源光谱展宽,从而令 SBS 的增益峰谱宽与 Δf 相等。

2 游标效应的改进方案

从公式(2)可知原系统随着系统带宽的增大所需的扫描次数线性增加,如果要降低扫描次数必须牺牲测频精度。为了在保证测频精度的同时降低系统的扫描次数,利用游标效应对原有系统进行了改进,改进后的系统如图 2 所示。

与原系统相比,上路信号光路保持不变,下路利用频率梳而非单色光作为泵浦光。DFB 激光器发出的频率为 f_c 的单色光经过频移后频率变为 $f_c + f_{SBS}$,然后进入频率梳(FC)发生器^[11]后生成以 $f_c + f_{SBS}$ 为中心,

频率间隔可控的频率梳,经过滤波器控制后保留 $f_c + f_{SBS}$ 右侧带宽约为 100 GHz 的梳齿,然后经过 EDFA 放大泵浦上路信号光,形成如图 3 所示以 f_c 为起始频率,带宽 100 GHz,周期等于频率梳梳齿间隔的 SBS 增益谱。图 2 中用了两个频率梳发生器构成频率间隔分别为 FSR_1 、 FSR_2 ($FSR_1 > FSR_2$) 的两套频率梳,具体原因将在下文中阐述。

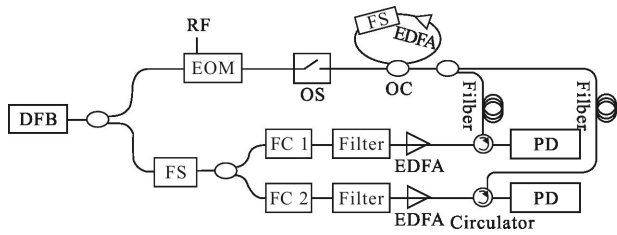


图 2 基于游标效应的改进系统图

Fig.2 Scheme of improved system based on vernier effect

改进后的系统增益谱得到扩展,原系统上边带信号必须频移至 $f_c - f_{SBS}$ 处的 SBS 增益峰才能够探测到信号,而图 3 中的改进后的系统上边带信号只需要频移至左侧邻近的增益峰,因而改进后的系统可以显著减少扫描次数。然而由于增益谱的周期性特征,系统无法直接测得微波信号的绝对频率。如图 3 所示,对于频率为 f_s 的微波信号,假设只利用间隔为 FSR_1 的频率梳,则有 $f_s = mFSR_1 + f_1$,只能测得 f_s 除以 FSR_1 后的余数 f_1 而无法获得 m 的准确信息。

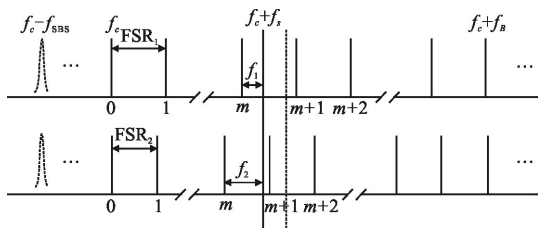


图 3 游标效应测频原理图

Fig.3 Principle of frequency measurement by vernier effect

为了得到 m 的准确值,笔者利用了游标效应,即利用两套具有不同频率间隔的频率梳作为泵浦源,构建方程组求解 m 值。当待测微波信号频率低于 FSR_1 和 FSR_2 的最小公倍数时,即

$$f_s < \frac{FSR_1 \cdot FSR_2}{\Delta FSR} \quad (3)$$

式中: $\Delta FSR = FSR_1 - FSR_2$, 对于图 3 中的实线和虚线

两种情况可以分别得到:

$$\begin{cases} f_s = mFSR_1 + f_1 = mFSR_2 + f_2 & f_1 < f_2 \\ f_s = mFSR_1 + f_1 = (m+1)FSR_2 + f_2 & f_1 > f_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 为整数。由公式(4)可以看出通过两套增益谱构建出一个含有 f_s 、 m 的方程组,因此得出:

$$m = \begin{cases} \frac{f_2 - f_1}{\Delta FSR} & f_1 < f_2 \\ \frac{f_1 - f_2 + FSR_2}{\Delta FSR} & f_1 > f_2 \end{cases} \quad (5)$$

即利用两套频率梳分别测得 f_1 和 f_2 后就可以直接解算出 m 值,再代入公式(4)即可求得 f_s 。

3 改进方案的测频精度分析

这部分对改进后系统的测频精度进行分析,讨论光源抖动、频率梳稳定性等因素对系统的影响。由公式(4)可得 f_s 的误差值为 $\Delta f_s = \Delta m \cdot FSR_1 + \Delta f_1$,因此系统的精度取决于商 m 的测量误差 Δm 和余数 f_1 的误差 Δf_1 。

首先考虑 f_1 的误差, f_1 的精度最高为 Δf ,另外由于光源频率抖动、频率梳的不稳定性会造成精度的进一步下降。为了方便比较,这里令 Δf 取一个典型值 100 MHz,由于系统信号光与泵浦光源自同一个 DFB 激光器,因此光源抖动带来的影响可以消除。频率梳的稳定性主要取决于所用微波源的稳定性,并且随着梳齿增加不稳定性会成倍增加,这里取 FSR_1 的典型值为 5 GHz,在系统带宽 100 GHz 内会有 20 根梳齿,采用一般的微波源即可将频率梳的不稳定性降低至 1 MHz 以内,相比于 Δf 可以忽略。另外在频率梳产生过程中需要先将 DFB 发出的频率为 f_c 的单体光频移至 $f_c + f_{SBS}$,该过程引入的误差也可以控制在远小于 Δf 。综合以上分析,可以认为 f_1 的误差主要取决于 Δf ,系统其他因素的影响可以忽略,同样对于 f_2 也成立。

下面考虑 m 的误差,根据公式(5)可得 $\Delta m = 2\Delta f / \Delta FSR$ 。当 Δm 绝对值小于 0.5,通过四舍五入可以准确恢复 m 值即 $\Delta m = 0$,否则恢复出的 m 为另一个整数,将会导致计算出的 f_s 与真实值相差 FSR_1 的整数倍,也就是至少 5 GHz 的计量误差,使系统无法工作。当

$$\Delta FSR > 4\Delta f \quad (6)$$

有 $|\Delta m| < 0.5$,舍去后有 $\Delta m = 0$,此时可以获得准

确的 m 值。公式(3)和公式(6)分别为系统的工作带宽和系统正常工作的条件。

通过控制梳齿间隔使公式(6)得到满足,可以实现 m 值的无误差获取,因此改进后的系统测频误差仅取决于余数的误差 Δf ,与原系统精度相同。

4 性能比较与仿真分析

下面分析与原方案相比改进后的系统在扫描次数方面的性能提升。假设系统的工作带宽为 f_B ,由公式(2)可知原系统所需的扫描次数为:

$$n_1 = \frac{f_B + f_{SBS}}{\Delta f} \quad (7)$$

对于改进后的系统,系统只需在 FSR_1 、 FSR_2 内完成扫描即可解算出微波频率,因此所需的扫描次数为:

$$n_2 = \frac{FSR_1}{\Delta f} \quad (8)$$

式中: FSR_1 与 f_B 的关系可以由公式(3)、(6)联立求出。表达式为:

$$f_B = \frac{(FSR_1 - 4\Delta f) \cdot FSR_1}{4\Delta f} \quad (9)$$

一般情况下可以认为 $FSR_1 \gg 4\Delta f$,因此公式(8)可以写为:

$$n_2 = 2\sqrt{\frac{f_B}{\Delta f}} \quad (10)$$

根据公式(7)、(10)仿真研究了改进前后系统的扫描次数。系统的扫描次数与测频精度 Δf 、带宽 f_B 相关,图 4 给出了在 Δf 为 100 MHz 时改进前后系统

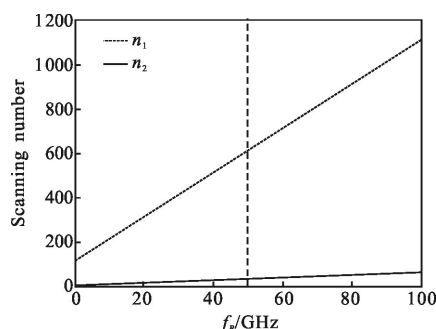


图 4 精度 100 MHz 时的扫描次数比较

Fig.4 Comparison of scanning number under 100 MHz precision

的扫描次数 n_1 、 n_2 与带宽 f_B 的关系。从图中可以看出改进后的系统扫描次数明显低于原系统,并且在在大带宽时具有绝对优势。当 $f_B=50$ GHz 时 $n_1=610$, $n_2=$

47, $n_1/n_2 \approx 13$,即系统的扫描次数降低为原来的 7%,扫描效率得到大幅提升。

另外还研究了改进后的系统在带宽上与原系统的差异。图 5 给出了在测频精度 $\Delta f=100$ MHz、扫描次数相等的条件下,改进后的系统带宽 f_{B2} 与原系统带宽 f_{B1} 的关系。从图中可以看到在相同的扫描次数下改进后的系统具有更大的带宽,当 $f_{B1}=10$ GHz 时,由公式(7)得扫描次数 $n=210$,根据公式(8) $FSR_1=21$ GHz,再根据公式(9)可得 $f_{B2} \approx 1.1$ THz。实际上由于调制器的带宽限制系统的带宽不会超过 100 GHz,但是显然改进后的系统带宽得到了极大的提高。

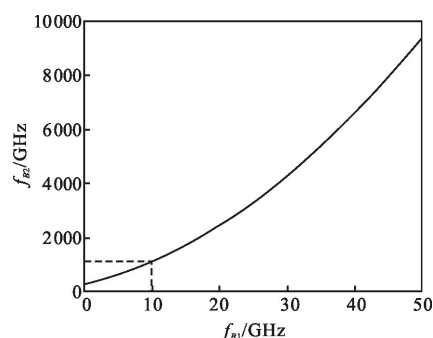


图 5 精度 100 MHz 时改进后的系统带宽

Fig.5 System bandwidth under 100 MHz precision after improving

5 结论

利用频率梳泵浦和游标效应对基于 SBS 的扫描式频率测量系统进行了改进,通过频率梳构造了周期性的增益谱,降低了系统的扫描时间,并借助游标效应解算出信号的频率。给出了改进后系统的工作带宽、工作条件,比较了改进前后系统的扫描次数和带宽。仿真结果表明与原系统相比改进后的系统在相同的频率测量精度和系统带宽时,扫描次数降低,效率得到大幅提高,在相同的频率测量精度和扫描次数下,带宽更大。因此,改进后的系统性能得到了大幅提升。

参考文献:

[1] Yi Ming, Wang Xiao, Wang Long. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 601-607. (in Chinese)
易明, 王晓, 王龙. 美军光电对抗技术, 装备现状与发展趋

- 势初探[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 601–607.
- [2] Wang Wei, Zhang Aihua, Yang Keng, et al. Design of ultra-compact microwave photonic filter based on SOI microring resonators[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 465–469. (in Chinese)
王巍, 张爱华, 杨铿, 等. 基于微环谐振器的超紧凑微波光子滤波器的设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 465–469.
- [3] Wang W, Davis R L, Jung T J, et al. Characterization of a coherent optical RF channelizer based on a diffraction grating [J]. *IEEE Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(10): 1996–2001.
- [4] Zou X, Pan W, Luo B, et al. Photonic approach for multiple frequency component measurement using spectrally sliced incoherent source[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 438–440.
- [5] Chi H, Zou X, Yao J. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(14): 1249–1251.
- [6] Zhang X, Chi H, Zhang X, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using an optical phase modulator[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, 19(6): 422–424.
- [7] Rugeland P, Yu Z, Sterner C, et al. Photonic scanning receiver using an electrically tuned fiber Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(24): 3794–3796.
- [8] Li R, Chen H, Yu Y, et al. Multiple-frequency measurement based on serial photonic channelization using optical wavelength scanning[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4781–4784.
- [9] Nguyen T A, Chan E H W, Minasian R A. Instantaneous high-resolution multiple frequency measurement system based on frequency-to-time mapping technique [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2419–2422.
- [10] Jin L, Li M, He J J. Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with vernier effect [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 156–159.
- [11] 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.