

采用正交光功率比值的光子型微波频率测量方案设计

邹喜华 潘 炜 罗 斌 闫连山 郑 狄

(西南交通大学信息科学与技术学院 信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)

摘要 通过构建两个正交的光功率比值,以光子技术实施微波频率测量。首先,待测微波信号经外调制器加载到连续光源上,在单边带载波抑制调制下仅得到单个光边带;以光学梳状滤波器对其进行滤波处理,在输出端检测到随微波频率增大而呈现余弦函数和正弦函数变化趋势的两个光功率;将这两个光功率与参考光功率进行比较后,进而得到余弦函数型和正弦函数型两个光功率比值,即正交光功率比值。基于这两个正交光功率比值,可以在整个梳状滤波响应的自由频谱区内检测出唯一的频率值。进而设计了两种具体方案来实现这一测频思路:两个连续光源和单个光学梳状滤波器的组合;或者单个连续光源和两个光学梳状滤波器的组合,并从实验上验证了方案二的可行性。与已报道的类似方案相比,设计的测频方案扩大了测频范围,尤其是在级联或并联型测频结构设计中具有潜在应用前景。

关键词 信号处理;微波频率测量;微波光子学;光功率检测

中图分类号 TN29; TM935 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0306002

Photonic Approach Using Quadrature Optical Power Ratios for Microwave Frequency Measurement

Zou Xihua Pan Wei Luo Bin Yan Lianshan Zheng Di

(Center for Information Photonics and Communications School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract A photonic approach using two quadrature optical power ratios is proposed to perform microwave frequency measurement. First, under the carrier-suppression and single-sideband modulation, a microwave signal is applied to modulate a continuous-wave (CW) laser source, leading to the generation of a single sideband. Then optical comb filters are adopted to process the sideband and two optical powers presenting sine-form and cosine-form distributions are detected as the microwave frequency increases. After comparing the two optical powers to the reference power, two optical power ratios of sine-form and cosine-form are obtained, namely quadrature optical power ratios. Based on the two optical ratios, the frequency is unambiguously estimated within the full free spectral range (FSR) of the comb filtering responses. Two setups are designed to verify the proposed approach, one consisting of two laser sources and a single comb filter, and the other including a single laser source and two comb filters. The latter setup is experimentally demonstrated. Compared with other reported approach, the proposed approach provides a larger measurement range and a promising way to design cascaded or parallel configurations.

Key words signal processing; microwave frequency measurement; microwave photonics; optical power monitoring

OCIS codes 060.5625; 060.2420; 350.4010; 070.2615

1 引言

作为融合光子技术和微波技术的交叉学科,微波光子学利用光子技术生成、传输以及处理微波信

号,具有处理带宽大、损耗小和抗电磁干扰能力强等优势。随着微波光子学的兴起,光子技术型方案已成为微波信号检测、微波滤波、微波信号发生、超宽

收稿日期: 2010-05-20; **收到修改稿日期**: 2010-07-06

基金项目: 教育部高等学校博士点基金新教师基金(2010018412007)和中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU09CX033, SWJTU09ZT14)资助课题。

作者简介: 邹喜华(1981—),男,博士,副教授,主要从事微波光子、光通信与信号处理等方面的研究。

E-mail: zouxh_swjtu@yahoo.com.cn

带脉冲信号的生成和传输、宽带无线通信、高速模-数转换和相控阵天线等领域的研发热点^[1~6]。

同样,得益于光子技术的宽带瞬时处理能力,光子技术型微波测频受到了广泛的关注。一方面,通信、雷达、现代电子战中采用或拟采用的频率不断攀升,几乎跨越了 2 MHz~300 GHz 的频段^[7],因而测频过程既要求快速实时,又需要具备宽带覆盖范围。另一方面,电子技术型测频已大量商用^[7~10],但受限于响应带宽;借助于扫描工作模式和前端混频器可以扩展测量范围,但在扫描工作模式下容易导致某些时刻的某些频率信息被遗漏。与此同时,利用光子技术的宽带瞬时性能可以在宽带测量范围内对突发性很强、存在的时间很短的微波信号的频率进行追踪和捕获;因而有关报道日趋增多,发展前景广阔。

目前,已报道的光子技术型快速测频方案大致基于三种原理:频率-幅度映射^[11~19]、频率-时域映射^[20]、频率-空间映射^[21~28]。在这一系列方案中,采用光功率检测的频率-幅度映射型方案的优势在于低速的光电探测器即可满足需要。具体实施方案包括,利用光学梳状滤波器或光纤光栅对光边带进行滤波,将微波频率信息转换成光功率的变化,从而在相当于梳状滤波谱半个自由频谱区(FSR)的频率范围内实现了测频^[24,25,28]。但是当待测频率超出这个范围后,检测的频率值将不具有唯一性,导致了测频的模糊性;这一问题既限制了测频范围,同时也给级联或并行结构方案的设计带来了解调上的困难。

因此,本文提出在光子型测频方案中构建两个正交的光功率比值,以此实施频率测量。这一设计思路通过两种具体方案来实现。第一种方案由两个连续光源和一个光梳状滤波器构成,其中一个光载波位于滤波响应的波峰位置,另一个波长位于滤波响应的-3 dB点。在单边带载波抑制(CS-SSB)调制下,两个波长处检测得到的光功率随着微波频率的增大而分别呈现余弦函数型和正弦函数型变化趋势,进而得到余弦函数型和正弦函数型变化趋势的两个光功率比值,即正交的光功率比值。第二种方案由单个连续光源和两个光学梳状滤波器构成,这两个滤波器的梳状滤波响应呈现正交关系。将光载波对准一个滤波器滤波响应的波峰位置,其必然对应另一滤波器滤波响应的-3 dB点,从而在两个滤波器的输出端口检测得到余弦函数型和正弦函数型变化趋势的光功率,进而得到两个正交光功率比值。基于正交光功率比值,两种方案都可以在整个梳状滤波

响应的FSR内检测出唯一的频率值。与以前报道的方案中的测量范围(半个FSR)相比^[24,25,28],提出的方案扩大了测量范围;尤其是它们在整个FSR内频率解调是唯一的,因而在级联型或其它组合型测频方案设计中至关重要。

2 方案设计与工作原理

为构建正交的光功率比值,设计了两种具体方案,如图1和图3所示,其中WDM为波分复用器,PD为光探测器。如图1所示,第一种方案主要由两个连续光源和一个光梳状滤波器构成,其中一个光波长 λ_1 位于梳状滤波响应的波峰位置,另一个波长 λ_2 则位于梳状滤波响应的-3 dB点,如图2所示。待测的微波信号输入到电光外调制器中对两个连续光信号进行调制,在CS-SSB条件下仅得到一阶光边带。这两个波长处的一阶光边带同时耦合进梳状滤波器和参考臂之中,经滤波器处理后,在波长 λ_1 处检测得到的光功率随着微波频率的增大而呈现余弦函数变化趋势,在波长 λ_2 处检测得到的光功率随着微波频率的增大而呈现正弦函数变化趋势。参考臂中,在波长 λ_1 和 λ_2 处检测的光功率作为参考,以消除微波功率以及光功率波动对测频性能的影响。将梳状滤波器的输出光功率与参考光功率进行比较,在波长 λ_1 和 λ_2 处分别得到余弦函数和正弦函数型两个光功率比值 R_1 和 R_2 ,即正交的光功率比值。

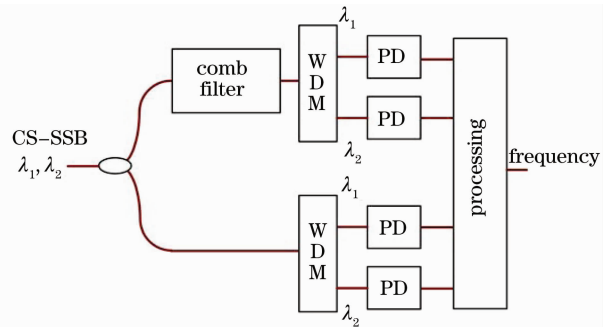


图1 第一种方案的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the first approach

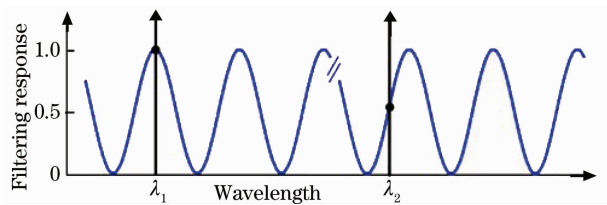


图2 第一种方案中采用的梳状滤波器的滤波响应

Fig. 2 Filtering response of comb filter used in first approach

$$\begin{cases} R_1 = [1 + \cos(2\pi f/F)]/2 \\ R_2 = [1 + \sin(2\pi f/F)]/2 \end{cases}, \quad (1)$$

其中 f 为微波频率, F 为 FSR。

第二种方案如图 3 所示, 它由单个连续光源和两个光梳状滤波器构成。这两个滤波器的滤波响应呈现正交关系, 当光波长的位置位于其中一个滤波器响应的波峰位置时, 此波长也必然对应另一滤波器响应的 -3 dB 点, 如图 4 所示。同样, 在 CS-SSB 条件下, 由微波信号调制连续光源而生成的单个光边带同时输入到两个光梳状滤波器以及参考臂中。在两个滤波器输出端, 检测得到的光功率 (P_1 和 P_2) 随着微波频率的增大而呈现余弦函数型和正弦函数型变化趋势, 在参考臂中检测的参考光功率为 P_0 。将两个滤波器的输出光功率与参考光功率进行比较, 得到余弦函数型和正弦函数型变化趋势的两个正交光功率比值 R_1 和 R_2 :

$$\begin{cases} R_1 = \frac{P_1}{P_0} = [1 + \cos(2\pi f/F)]/2 \\ R_2 = \frac{P_2}{P_0} = [1 + \sin(2\pi f/F)]/2 \end{cases}. \quad (2)$$

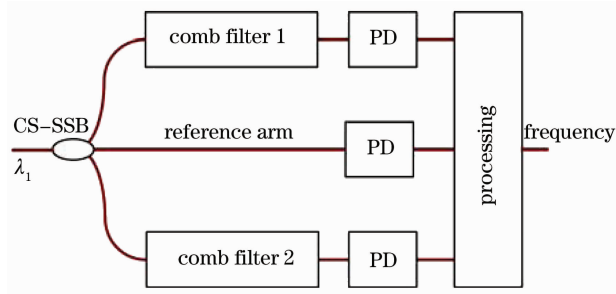


图 3 第二种方案的结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the second approach

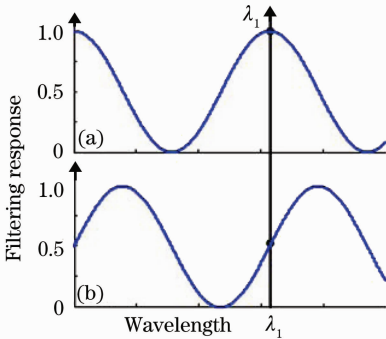


图 4 第二种方案中采用的两个梳状滤波器的滤波响应

Fig. 4 Filtering responses of two comb filters used in the second approach

至此, 两种方案下均得到了两个互为正交的光功率比值; 基于两个正交的光功率比值, 可以在整个

梳状滤波响应的 FSR 内检测出唯一的频率值, 如 (3) 式所示:

$$f = \begin{cases} \frac{\arccos(2R_1 - 1)}{2\pi} \times F, & R_2 \geq 0.5 \\ \left[1 - \frac{\arccos(2R_1 - 1)}{2\pi}\right] \times F, & R_2 < 0.5 \end{cases}. \quad (3)$$

需要指出的是, (1), (2) 和 (3) 式所反应的测频原理实质上与电子技术型测频方案中采用两个或多个鉴相输出功率的方式具有异曲同工之妙^[7]。

3 实验验证

为了验证所提出的采用正交光功率比值的测频方案, 设计了一个具体的实验装置来实施第二种方案。如图 5 所示, 一段保偏光纤 (PMF) 被用于构建具有正交滤波响应的两个梳状滤波器。已调制光信号分成两路分别从上、下两个方向通过保偏光纤, 然后各自输入到一个检偏器中。通过调节每一路上保偏光纤前、后两端的偏振控制器 (PC), 可以获得 FSR 一致、但存在 90° 相移的两个梳状滤波响应 (FSR 为 47 GHz), 即构建了两个正交滤波器。

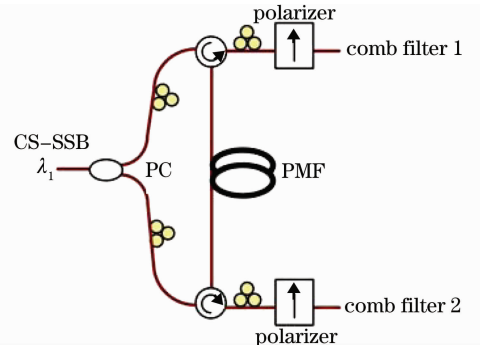


图 5 实验中设计的两个梳状滤波器

Fig. 5 Two comb filters designed in experiment

以所设计的两个梳状滤波器进行测频步骤如下: GPIB 链路控制微波信号源以 1 GHz 的步长在 10~40 GHz 范围内扫描; 分别检测两个滤波器的输出光功率以及不加滤波器时的参考光功率, 得到三个光功率 (P_0, P_1, P_2) 随频率的变化关系如图 6(a) 所示。隐约可见光功率 P_1 和 P_2 具有余弦和正弦分布趋势, 其中 P_0, P_1, P_2 分别参考臂、第一个梳状滤波器和第二个梳状滤波器输出端的光功率。将三个光功率进行比较后, 得到两个光功率比值 R_1 和 R_2 , 如图 6(b) 所示。不难发现, 光功率比值消除了微波功率波动的影响 (实质为调制器半波电压的频率相关性), 以及整个链路不平坦频响的影响, 从而

得到了清晰的余弦函数和正弦函数型光功率比值。由这两个正交光功率比值即可解调出输入信号的频率,结果如图 6(c)所示。在 17~36 GHz 范围内测

频误差低于 ± 1 GHz,有效地消除了余弦函数型光功率比值(R_1)在一个周期内的双值现象导致的测频模糊,因而从实验上验证了方案二的有效性。

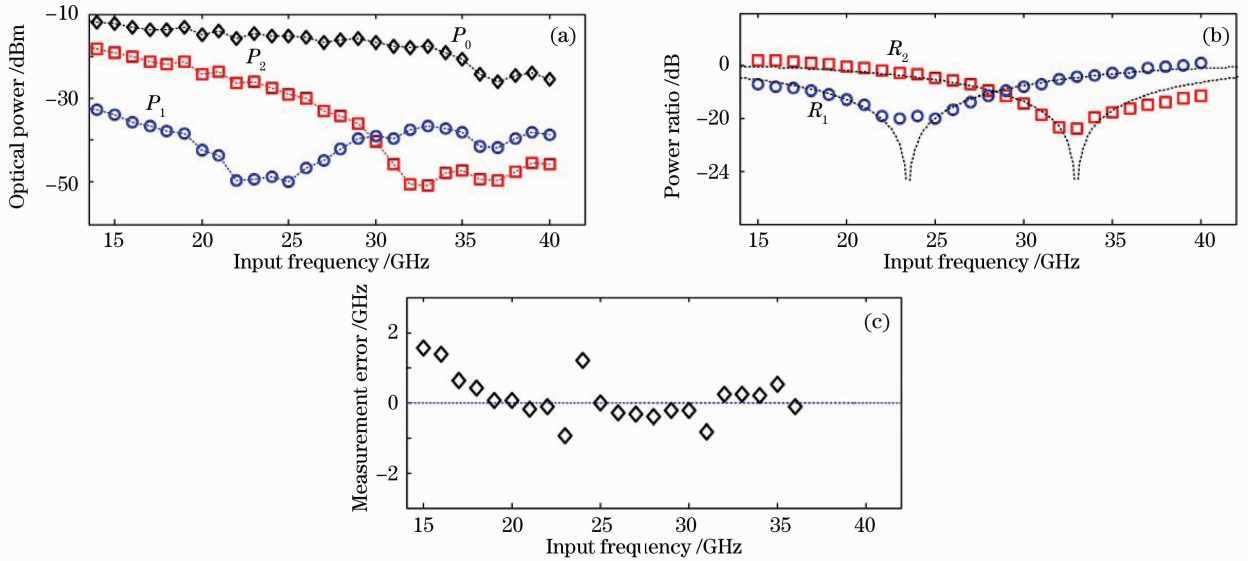


图 6 实验结果。(a)检测的三个光功率分布,(b)正交的光功率比值,(c)测频误差

Fig. 6 Experimental results. (a) Three detected optical powers, (b) derived quadrature optical power ratios, (c) errors of frequency measurement

另外,本文侧重于测频方案的设计以及实验验证,测频精度、稳定性和可重复性的提高还有待于进一步的研究和解决。

4 结 论

通过构建两个正交光功率比值实施微波频率测量:以光学梳状滤波器对经微波信号调制而生成的单个光边带进行滤波处理,经检测和对比后得到两个正交光功率比值,进而以它们在整个梳状滤波响应的FSR内解调出唯一的频率值。具体实施方案包括采用两个光源和单个梳状滤波器的方案一,以及采用单个光源和两个正交梳状滤波器的方案二。在实验过程中,测频结果在17~36 GHz范围内的误差低于 ± 1 GHz,验证了方案二的有效性。由于文中报道的测频方案在整个FSR的频率解调值是唯一的,不仅扩大了测频范围,而且为设计级联型或组合型等优化的测频方案提供了一种有效途径。

参 考 文 献

- 1 A. J. Seeds. Microwave photonics[J]. *IEEE Trans. Microwave Theor. Technol.*, 2002, **50**(3): 877~887
- 2 R. A. Minasian. Photonic signal processing of microwave signals [J]. *IEEE Trans. Microwave Theor. Technol.*, 2006, **54**(2): 832~846
- 3 J. Capmany, D. Novak. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(6): 319~330

- 4 J. P. Yao. Microwave photonics[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 314~355
- 5 Fu Xin, Zhang Hongming, Yao Minyu. Optical quantization technique for microwave signal based on double channel sampling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1454~1458
- 傅鑫,张洪明,姚敏玉.基于双路采样非相干叠加的微波信号光量化技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1454~1458
- 6 Wang Jing, Cao Zizheng, Zhou Hui *et al.*. A wavelength division multiplexing radio-over-fiber system with 58 GHz optical orthogonal frequency division multiplexing millimeter-wave signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1274~1278
- 王晶,曹子峥,周慧等.承载正交频分复用信号的58 GHz光载毫米波波分复用光纤无线通信系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1274~1278
- 7 J. B. Tsui. *Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications*[M]. North Caroling: Scitech Publishing, 1986
- 8 G. W. Anderson, D. C. Webb, A. E. Spezio *et al.*. Advanced channelization technology for RF, microwave, and millimeter wave applications[J]. *IEEE*, 1991, **79**(3): 355~388
- 9 B. Boashash. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal (part 1 and part 2) [J]. *IEEE*, 1992, **80**(4): 520~568
- 10 Hu Laizhao. *Instantaneous Frequency Measurement* [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2002
- 胡来招. *瞬时测频*[M]. 北京:国防工业出版社, 2002
- 11 L. V. T. Nguyen, D. B. Hunter. A photonic technique for microwave frequency measurement[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(10): 1188~1190
- 12 X. Zou, J. P. Yao. An optical approach to microwave frequency measurement with adjustable measurement range and resolution [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(23): 1989~1991
- 13 M. Attygalle, D. B. Hunter. Improved photonic technique for radio-frequency measurement[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(4): 206~208
- 14 J. Li, S. Fu, K. Xu *et al.*. Photonic-assisted microwave

- frequency measurement with higher resolution and tunable range [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(6): 743~745
- 15 X. Zhang, H. Chi, X. Zhang *et al.*. Instantaneous microwave frequency measurement using an optical phase modulator [J]. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 2009, **19**(6): 422~424
- 16 J. Zhou, S. Fu, S. Aditya *et al.*. Instantaneous microwave frequency measurement using photonic technique [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(15): 1069~1071
- 17 X. Zou, S. Pan, J. P. Yao. Instantaneous microwave frequency measurement with improved measurement range and resolution based on simultaneous phase modulation and intensity modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(23): 5314~5320
- 18 J. Zhou, S. Aditya, P. P. Shum *et al.*. Instantaneous microwave frequency measurement using a photonic microwave filter with an infinite impulse response [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(10): 682~684
- 19 X. Zou, W. Pan, B. Luo *et al.*. Dispersion-induced-loss-independent photonic instantaneous frequency measurement using remote-fiber-based tunable microwave filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(15): 1090~1092
- 20 L. V. T. Nguyen. Microwave photonic technique for frequency measurement of simultaneous signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(10): 642~644
- 21 W. Wang, R. L. Davis, T. J. Jung *et al.*. Characterization of a coherent optical RF channelizer based on a diffraction grating [J]. *IEEE Trans. Microw. Theor. Technol.*, 2001, **49**(10): 1996~2001
- 22 S. T. Winnall, A. C. Lindsay, M. W. Austin *et al.*. A microwave channelizer and spectroscopier based on an integrated optical Bragg-grating Fabry-Perot and integrated hybrid Fresnel lens system [J]. *IEEE Trans. Microwave Theor. Technol.*, 2006, **54**(2): 868~872
- 23 N. Sarkhosh, H. Emami, L. Bui *et al.*. Reduced cost photonic instantaneous frequency measurement system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(18): 1521~1523
- 24 H. Chi, X. Zou, J. P. Yao. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(14): 1249~1251
- 25 X. Zou, H. Chi, J. P. Yao. Microwave frequency measurement based on optical power monitoring using a complementary optical filter pair [J]. *IEEE Trans. Microwave Theor. Technol.*, 2009, **57**(2): 505~511
- 26 L. A. Bui, M. D. Pelusi, T. D. Vo *et al.*. Instantaneous frequency measurement system using optical mixing in highly nonlinear fiber [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 22983~22991
- 27 X. Zou, W. Pan, B. Luo *et al.*. Photonic approach for multiple-frequency-component measurement using spectrally-sliced incoherent source [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(3): 438~440
- 28 Z. Li, B. Yang, H. Chi *et al.*. Photonic instantaneous measurement of microwave frequency using fiber Bragg grating [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(3): 396~399