



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110398292 B

(45) 授权公告日 2020.12.22

(21) 申请号 201910623491.8

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2019.07.11

G01J 9/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G01J 3/28 (2006.01)

申请公布号 CN 110398292 A

G01J 3/12 (2006.01)

(43) 申请公布日 2019.11.01

审查员 郜慧斌

(73) 专利权人 北京大学

地址 100871 北京市海淀区颐和园路5号北京大学

专利权人 北京大学深圳研究院

(72) 发明人 彭焕发 陈章渊 郭锐 徐永驰

杜华阳

(74) 专利代理机构 北京君尚知识产权代理有限公司 11200

代理人 司立彬

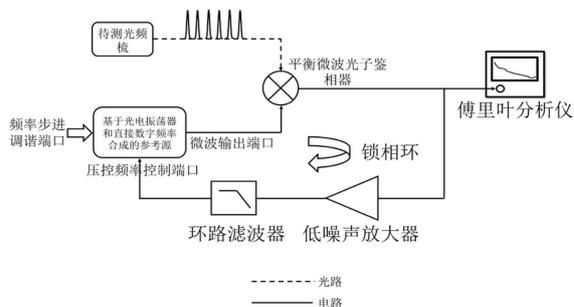
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种高灵敏度的光频梳时钟抖动测量方法及系统

(57) 摘要

本发明公开了一种高灵敏度的光频梳时钟抖动测量方法及系统。本系统包括傅里叶分析仪、参考源和一锁相环路；锁相环路包括平衡微波光子鉴相器、低噪声放大器和环路滤波器；平衡微波光子鉴相器与该参考源的高频微波输出端口连接，用于对待测光频梳重复频率的整数次谐波与高频微波输出端口输出的参考微波信号的相位进行比较，得到两者的误差相位并将其转换成误差电压输出给低噪声放大器；低噪声放大器经环路滤波器与该参考源的压控频率控制端口连接；参考源的频率步进调谐端口，用于接收频率步进调谐参考源的频率；傅里叶分析仪，与平衡微波光子鉴相器的输出端连接，用于获得待测光频梳重复频率整数次谐波的相位噪声功率谱，计算待测光频梳的时钟抖动。



1. 一种高灵敏度的光频梳时钟抖动测量方法,其步骤包括:

设置一参考源,该参考源设有一频率步进调谐端口、一压控频率控制端口以及一高频微波输出端口;其中该参考源包括一光电振荡器和直接数字频率合成器,该光电振荡器的输出端与一微波功分器输入端连接,该微波功分器的一输出端经一微波分频器与直接数字频率合成器的一输入端连接,该微波功分器的另一输出端与微波混频器的一输入端连接;该直接数字频率合成器的另一输入端与一微处理器连接,该微处理器用于控制直接数字频率合成器的频率控制字,实现对微波参考信号的频率步进调谐;该直接数字频率合成器的输出端与该微波混频器的另一输入端连接,该微波混频器的输出端为该参考源的高频微波输出端口;该光电振荡器的压控视频移相器控制端为该参考源的压控频率控制端口,该控制直接数字频率合成器与微处理器连接的端口为该参考源的频率步进调谐端口;

将待测光频梳重复频率的整数次谐波与该高频微波输出端口输出的参考微波信号分别输入锁相环路的平衡微波光子鉴相器进行相位比较,得到两者的误差相位;平衡微波光子鉴相器将该误差相位转换成误差电压;

将该误差电压经过锁相环路的低噪声放大器和环路滤波器之后,输入压控频率控制端口,对参考微波信号频率进行调谐;

通过频率步进调谐端口接收的频率步进调谐参考源的频率,使得参考源高频微波输出端口输出的参考微波信号的频率与待测光频梳重复频率整数次谐波的频率之间的频率差小于锁相环的牵引范围;当参考微波信号的相位噪声低于待测光频梳重复频率整数次谐波的相位噪声时,采用傅里叶分析仪获得待测光频梳重复频率整数次谐波的相位噪声功率谱,然后通过该相位噪声功率谱,计算待测光频梳的时钟抖动。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述光电振荡器为双环结构。

3. 一种高灵敏度的光频梳时钟抖动测量系统,其特征在于,包括傅里叶分析仪、参考源和一锁相环路;该参考源设有一频率步进调谐端口、一压控频率控制端口以及一高频微波输出端口;锁相环路包括平衡微波光子鉴相器、低噪声放大器和环路滤波器;其中

该参考源包括一光电振荡器和直接数字频率合成器,该光电振荡器的输出端与一微波功分器输入端连接,该微波功分器的一输出端经一微波分频器与直接数字频率合成器的一输入端连接,该微波功分器的另一输出端与微波混频器的一输入端连接;该直接数字频率合成器的另一输入端与一微处理器连接,该微处理器用于控制直接数字频率合成器的频率控制字,实现对微波参考信号的频率步进调谐;该直接数字频率合成器的输出端与该微波混频器的另一输入端连接,该微波混频器的输出端为该参考源的高频微波输出端口;该光电振荡器的压控视频移相器控制端为该参考源的压控频率控制端口,该控制直接数字频率合成器与微处理器连接的端口为该参考源的频率步进调谐端口;

平衡微波光子鉴相器,与该参考源的高频微波输出端口连接,用于对待测光频梳重复频率的整数次谐波与高频微波输出端口输出的参考微波信号的相位进行比较,得到两者的误差相位并将其转换成误差电压输出给低噪声放大器;

低噪声放大器经环路滤波器与该参考源的压控频率控制端口连接;

频率步进调谐端口,用于接收步进调谐参考源的频率,使得参考微波信号的频率与待测光频梳重复频率整数次谐波的频率之间的频率差小于锁相环的牵引范围;

傅里叶分析仪,与平衡微波光子鉴相器的输出端连接,用于获得待测光频梳重复频率

整数次谐波的相位噪声功率谱;通过该相位噪声功率谱,计算待测光频梳的时钟抖动。

4. 如权利要求3所述的系统,其特征在于,所述光电振荡器为双环结构。

## 一种高灵敏度的光频梳时钟抖动测量方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种适用于光频梳的极低时钟抖动测量方法及系统。通过构建一个光电混合锁相环将待测光频梳与一个极低相位噪声的高频、频率可调谐光电振荡器的相位锁定在一起,从而可获得光频梳整数倍重复频率成分的相位噪声,再通过该相位噪声转换成光频梳的时钟抖动,属于光学测量领域。

### 背景技术

[0002] 光学频率梳是指在光频谱上具有等频率间隔的光梳齿,在时域表现为一系列的超短光脉冲。光学频率梳在高精度光谱学、光信号处理、传感、光钟等领域具有巨大的应用潜力。近些年来,随着高性能光子模数转换器、高精度时频传递、超低相位噪声微波信号产生、光子雷达、大容量光通信与光互连以及光脉冲合成等的发展,越来越多地要求光频梳具有极低的时钟抖动。因此,高灵敏度的光频梳时钟抖动测量技术显得尤为重要。目前文献报道的光频梳时钟抖动测量方法主要包含五类:第一类是采用射频频谱分析法;第二类是鉴相法;第三类是光学互相关法;第四类是光学外差法;第五类是光纤延迟线法。

[0003] 以下是文献报道的五类光频梳时钟抖动测量技术和方案:

[0004] [1]方案1,如图1是采用射频频谱分析的方法,该方法最早于1986年提出(D. von der Linde, "Characterization of the noise in continuously operating mode-locked lasers," Appl. Phys. B. 39, 201-217, 1986.)。该方案通过一个宽带光电探测器检测出光脉冲的高阶谐波成分,通过带通滤波器选取需要分析的谐波成分,再通过频谱分析仪直接测量该谐波近端的噪声,从而得到光频梳的时钟抖动。

[0005] [2]方案2,如图2是鉴相法的系统结构。该方案的核心思想最先是用来测量微波信号源的相位噪声。由于光频梳的时钟抖动可由重复频率的相位噪声进行估计,因此通过测量光频梳重复频率的相位噪声可以间接得到光频梳的时钟抖动。该方案首先通过一个宽带光电探测器探测出待测光频梳的重复频率及其谐波成分,然后使用一个带通滤波器选择其中一个谐波成分,使用一个锁相环路将该谐波与一个频率相近的参考电振荡器的相位锁定在一起,在锁相环的鉴相器输出端就可以得到该谐波成分的相位噪声,从而获得光频梳的时钟抖动。

[0006] [3]方案3,如图3是基于光学互相关的时钟抖动测量系统。该方案最早于2007年提出(J. Kim, J. Chen, J. Cox, and F. X. Kartner, "Attosecond-resolution timing jitter characterization of free-running mode-locked lasers," Opt. Lett. 32, 3519-3521, 2007.)。该方法需要一个重复频率与待测光频梳重复频率相近的参考光频梳,并且参考光频梳的时钟抖动要低于待测光频梳的时钟抖动。通过一个由光学非线性晶体构成的光学互相关器比较待测光频梳与参考光频梳的脉冲时间差,从而获得待测光频梳的时钟抖动。

[0007] [4]方案4,如图4是光学外差测量技术,该方案于2015年提出(D. Hou, C. C. Lee, Z. Yang, and T. R. Schibli, "Timing jitter characterization of mode-locked lasers with  $<1\text{zs}/\sqrt{\text{Hz}}$  resolution using a simple optical heterodyne technique,"

Opt.Lett.40,2985-2988,2015.)。该方案需要一个参考光频梳,并且参考光频梳和待测光频梳的时钟抖动以及重复频率一致。通过对两个光频梳的两个独立光谱区域的频谱拍频,可以获得高灵敏度的时钟抖动测量。

[0008] [5]方案5,如图5为基于光纤延迟线法的测量结构,该方案基于延迟光学互相关技术,通过将待测光频梳的光信号进行延时,经过延时之后达到了延时光频梳和不延时光频梳的去相关操作,最后与待测光频梳直接输出的光信号进行光学互相关,从而达到了测量光频梳时钟抖动的目的。

[0009] 基于频谱分析仪的方法不能区分强度噪声和时钟抖动噪声,并且在低频偏处,自由运转的被动锁模光纤光频梳的时钟抖动噪声并不是平稳随机过程,因此导致测量结果不准确。基于鉴相器的方法,需要一个极低相位噪声的高频参考电振荡器,而电振荡器的相位噪声随频率的提高而恶化,从而导致系统测量灵敏度受限。基于光学互相关的方案具有较高的测量灵敏度,但也需要一个极低时钟抖动的参考光频梳,并且参考光频梳和待测光频梳的重复频率需要匹配,系统复杂。基于光学外差法是目前报道的最高灵敏度的方案,但该方案需要一个与待测光频梳性能一致的参考光频梳,系统复杂,灵活性较低。基于光纤延迟线的测量方案,不需要低相位噪声的微波参考振荡器或者高性能参考光频梳,但是该方法在测量具有极低时钟抖动的待测光频梳时,需要长达几公里甚至几十公里量级的光纤作为延时线,由于长光纤的引入,造成极大的光损耗,并且长光纤的引入带来了不可避免的噪声,降低了系统的灵敏度。此外,由于延迟自相关会导致测量结果存在一系列的杂散,从而降低了有效的频率偏移范围。延迟线的时延越大,有效的频率偏移范围越小。

## 发明内容

[0010] 针对现有技术方案中存在的技术问题,本发明的目的在于提供一种适用于光频梳极低时钟抖动的测量方法及系统。本发明采用光电振荡器和直接数字频率合成器结合的方法来实现参考源,本发明提出的参考振荡器方案具有同时实现极低相位噪声、相位噪声与频率无关、低杂散、宽带频率可调谐、高频率分辨率、快速频率切换的参考振荡器,能够大幅提升高频微波相位噪声分析仪的灵敏度。本发明适用于宽范围重复频率光频梳的极低时钟抖动测量。

[0011] 本方案构建了一个基于光电振荡器和直接数字频率合成器的高频、极低相位噪声、低杂散、高频率分辨率的频率可调谐参考源,采用双输出电光调制器和平衡光电探测器构成的平衡微波光子鉴相器比较参考振荡器与待测光频梳重复频率的整数次谐波的相位,最后通过锁相环实现两者的相位锁定。在平衡微波光子鉴相器输出端可得到待测光频梳重复频率整数次谐波的相位噪声,根据该相位噪声可以获得光频梳的时钟抖动。由于参考电振荡器具有极低相位噪声以及相位噪声与振荡频率无关的特点,本方案具有极高的时钟抖动测量灵敏度。并且通过调谐参考电振荡器的频率,可以实现不同重复频率的光频梳的时钟抖动测量,具有较高的灵活性。

[0012] 本发明的技术方案为:

[0013] 一种高灵敏度的光频梳时钟抖动测量方法,其步骤包括:

[0014] 设置一参考源,该参考源设有一频率步进调谐端口、一压控频率控制端口以及一高频微波输出端口;

[0015] 将待测光频梳重复频率的整数次谐波与该高频微波输出端口输出的参考微波信号分别输入锁相环路的平衡微波光子鉴相器进行相位比较,得到两者的误差相位;平衡微波光子鉴相器将该误差相位转换成误差电压;

[0016] 将该误差电压经过锁相环路的低噪声放大器和环路滤波器之后,输入压控频率控制端口,对参考微波信号频率进行调谐;

[0017] 通过频率步进调谐端口接收的频率步进调谐参考源的频率,使得参考源高频微波输出端口输出的参考微波信号的频率与待测光频梳重复频率整数次谐波的频率之间的频率差小于锁相环的牵引范围;当参考微波信号的相位噪声低于待测光频梳重复频率整数次谐波的相位噪声时,采用傅里叶分析仪获得待测光频梳重复频率整数次谐波的相位噪声功率谱,然后通过该相位噪声功率谱,计算待测光频梳的时钟抖动。

[0018] 一种高灵敏度的光频梳时钟抖动测量系统,其特征在于,包括傅里叶分析仪、参考源和一锁相环路;该参考源设有一频率步进调谐端口、一压控频率控制端口以及一高频微波输出端口;锁相环路包括平衡微波光子鉴相器、低噪声放大器和环路滤波器;其中

[0019] 平衡微波光子鉴相器,与该参考源的高频微波输出端口连接,用于对待测光频梳重复频率的整数次谐波与高频微波输出端口输出的参考微波信号的相位进行比较,得到两者的误差相位并将其转换成误差电压输出给低噪声放大器;

[0020] 低噪声放大器经环路滤波器与该参考源的压控频率控制端口连接;

[0021] 频率步进调谐端口,用于接收步进调谐参考源的频率,使得参考微波信号的频率与待测光频梳重复频率整数次谐波的频率之间的频率差小于锁相环的牵引范围;

[0022] 傅里叶分析仪,与平衡微波光子鉴相器的输出端连接,用于获得待测光频梳重复频率整数次谐波的相位噪声功率谱;通过该相位噪声功率谱,计算待测光频梳的时钟抖动。

[0023] 进一步的,该参考源包括一光电振荡器和直接数字频率合成器,该光电振荡器的输出端与一微波功分器输入端连接,该微波功分器的一输出端经一微波分频器与直接数字频率合成器的一输入端连接,该微波功分器的另一输出端与微波混频器的一输入端连接;该直接数字频率合成器的另一输入端与一微处理器连接,该微处理器用于控制直接数字频率合成器的频率控制字,实现对微波参考信号的频率步进调谐;该直接数字频率合成器的输出端与该微波混频器的另一输入端连接,该微波混频器的输出端为该参考源的高频微波输出端口;该光电振荡器的压控视频移相器控制端为该参考源的压控频率控制端口,该控制直接数字频率合成器与微处理器连接的端口为该参考源的频率步进调谐端口。

[0024] 进一步的,所述光电振荡器为双环结构。

[0025] 与现有技术相比,本发明的积极效果:

[0026] 1、本方案相比于射频频谱分析的方法,能够区分光频梳的强度噪声和时钟抖动噪声,测量结果更加准确。

[0027] 2、本方案相比于采用电子学振荡器的鉴相法,能够实现更高的时钟抖动测量灵敏度。由于鉴相法的测量灵敏度受限于参考振荡器的相位噪声,对于电子学振荡器,其相位噪声随工作频率的提高而急剧恶化,从而导致系统测量灵敏度受限。本方案基于光电振荡器结合平衡微波光子鉴相器来实现对待测光频梳时钟抖动的提取,得益于光电振荡器的高频、低相位噪声以及相位噪声与频率无关的特点,能够克服基于电子学振荡器鉴相法的低灵敏度问题。同时,该方案采用了平衡微波光子鉴相器,能够有效克服光电探测器的强度噪

声转相位噪声所带来的时间抖动测量误差。

[0028] 3、本方案相比于光学互相关法和光学外差法,不需要与待测光频梳性能匹配的参考光频梳,降低了系统实现的复杂度。同时本方案通过调谐参考振荡器的频率可以测量不同重复频率的光频梳的时钟抖动噪声,更具灵活性。

[0029] 4、本方案相比于光纤延迟线法,不需要较长的光纤延迟线,避免了长光纤传输损耗、散射噪声等所导致的时钟抖动测量灵敏度下降的问题。同时,还能克服光纤延迟线法有效测量频偏范围小的问题。

## 附图说明

[0030] 图1为方案1的结构图;

[0031] 图2为方案2的结构图;

[0032] 图3为方案3的结构图;

[0033] 图4为方案4的结构图;

[0034] 图5为方案5的结构图;

[0035] 图6为本发明方案的系统架构图;

[0036] 图7为本发明方案的结构图;

[0037] 图8为本发明方案的实验测量灵敏度图。

## 具体实施方式

[0038] 下面结合附图对本发明的方案进行进一步详细描述。

[0039] 本发明方案的系统架构如图6所示。该方案是基于锁相环的基本结构。该结构中的核心部件是基于光电振荡器和直接数字频率合成的低相位噪声高频微波参考源。该参考源有一个频率步进调谐端口,一个压控频率控制端口以及一个高频微波输出端口。通过改变该参考源的压控频率控制端口的电压,可以实现参考微波信号频率的连续调谐。同时,通过编程改变直接数字频率合成器的频率控制字,可以实现参考微波信号频率在较宽的频率范围内快速调谐,且频率调谐的分辨率可优于1Hz。锁相环路中的平衡微波光子鉴相器实现了待测光频梳重复频率的整数次谐波与参考微波信号的相位比较,从而得到两者的误差相位。平衡微波光子鉴相器将待测光频梳重复频率的整数次谐波与参考微波信号的误差相位转换成误差电压。误差电压经过低噪声放大器和环路滤波器之后,作为参考振荡器的压控频率控制端口的输入,从而连续调谐参考微波信号的频率,最后使得待测光频梳重复频率的整数次谐波与参考微波信号的频率相同。通过频率步进调谐端口接收的频率步进调谐参考源的频率,使得参考源微波输出端口输出的参考微波信号的频率靠近待测光频梳重复频率整数次谐波的频率,当两者的频率差小于锁相环的牵引范围时,锁相环能使得参考信号跟踪待测信号的相位。同时,环路滤波器采用二阶有源比例积分滤波器,可以保证两者之间相位正交的关系。当参考微波信号的相位噪声低于待测光频梳重复频率整数次谐波的相位噪声时,就能够在平衡微波光子鉴相器的输出端获得待测光频梳重复频率整数次谐波的相位抖动。最后采用傅里叶分析仪获得该谐波的相位噪声功率谱。通过该相位噪声功率谱,可以推算出光频梳的时钟抖动。

[0040] 本发明方案系统结构如图7所示。该结构分为两部分,第一部分为基于光电振荡器

和直接数字频率合成器的微波参考；第二部分为锁相环路。激光器输出连续波激光，并注入到电光调制器中，电光调制器的输出通过50:50的光耦合器分成两束，两束光分别通过长度不同的两段光纤构成双环结构，为了获得较好的副振荡模式抑制，两段光纤的长度比例在10倍左右。通过采用双环结构可实现光电振荡器副振荡模式的抑制，从而保证参考信号低杂散的特征。两段光纤的输出分别通过光电探测器转换成电信号，其中长光纤环路中的光电探测器输出端连接一个压控射频移相器，两个链路的微波电信号通过合波器耦合在一起。合波之后的微波信号通过三级低相位噪声放大器，第三级放大器的输出通过一个微波定向耦合器分成两路，其中一路信号反馈驱动电光调制器形成闭合的光电振荡回路，另外一路信号经过一个微波功分器分成两路。微波功分器的其中一个输出通过一个微波分频器，将光电振荡器的频率分频到其小数倍处，并作为直接数字频率合成器的采样时钟。微波功分器的另外一路输出与直接数字频率合成器的输出通过一个微波混频器进行混频，微波混频器的输出作为锁相环路的微波参考信号。通过微处理器控制直接数字频率合成器的频率控制字，可以实现微波参考信号的频率的步进调谐，同时通过改变压控射频移相器的控制电压，可以实现微波参考信号频率的连续调谐。得益于直接数字频率合成器，该微波参考信号具备高频率分辨率、快速频率切换以及频率可编程控制等特征，从而实现较宽频率范围的低相位噪声微波参考输出，大大增加测量系统的灵活性。在锁相环路中，本方案采用公知的平衡微波光子鉴相器。平衡微波光子鉴相器实现了微波参考信号与光频梳重复频率整数次谐波的相位比较并将两者的误差相位转换成误差电压输出。该平衡微波光子鉴相器由一个双输出电光强度调制器和平衡光电探测器构成。平衡微波光子鉴相器输出的误差电压经过一个直流低噪声放大器和环路滤波器之后，反馈到压控射频移相器的电压控制端口，从而形成闭合的锁相环路。当微波参考信号的相位噪声低于待测光频梳重复频率整数次谐波的相位噪声时，在平衡微波光子鉴相器的输出端就可以获得待测光频梳重复频率整数次谐波的相位噪声，从而可以理论计算得到光频梳的时钟抖动。

[0041] 为了验证该方案的有效性，实验评估了该测量方案的时钟抖动测量灵敏度。在实验中，激光器的波长为1550.12nm，功率为50mW，电光强度调制器的模拟带宽为20GHz，采用的光纤长度分别为0.1公里和2公里，两个光电探测器的响应带宽为20GHz，压控射频移相器的工作频率范围为6GHz~15GHz，移相范围大于360度，电带通滤波器的中心频率为10GHz，3-dB带宽为3MHz，三个低相位噪声放大器的增益分别为15dB，微波分频器的分频比为4，双输出电光调制器的模拟带宽为40GHz，平衡光电探测器的模拟带宽为10GHz，直接数字频率合成器的时钟频率为2.5GHz，环路滤波器采用有源二阶比例积分滤波器，实验测试得到的系统相位噪声和时间噪声谱密度结果如图8所示。对应于10GHz重复频率处的时间噪声谱密度为711zs/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。

[0042] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内，所做的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明保护的范围之内。

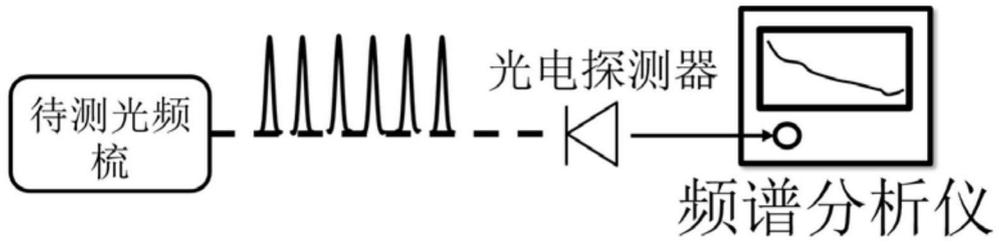


图1

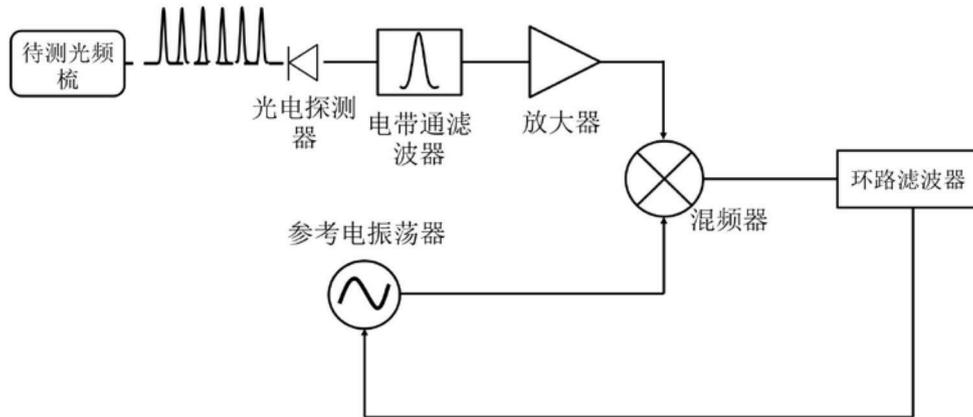


图2

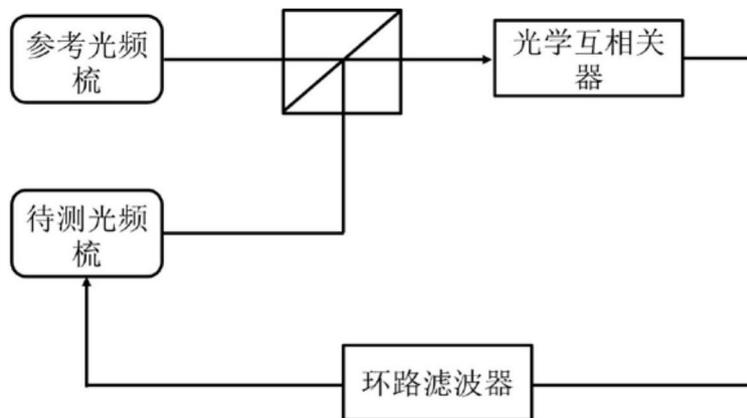


图3

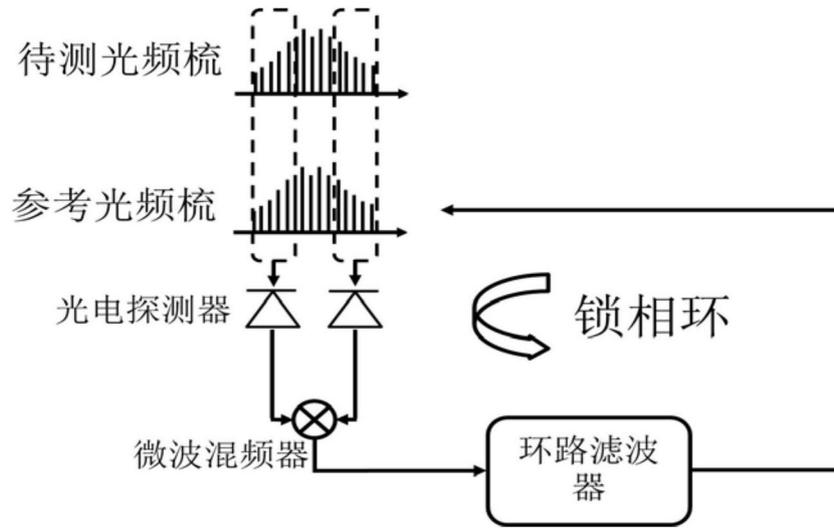


图4

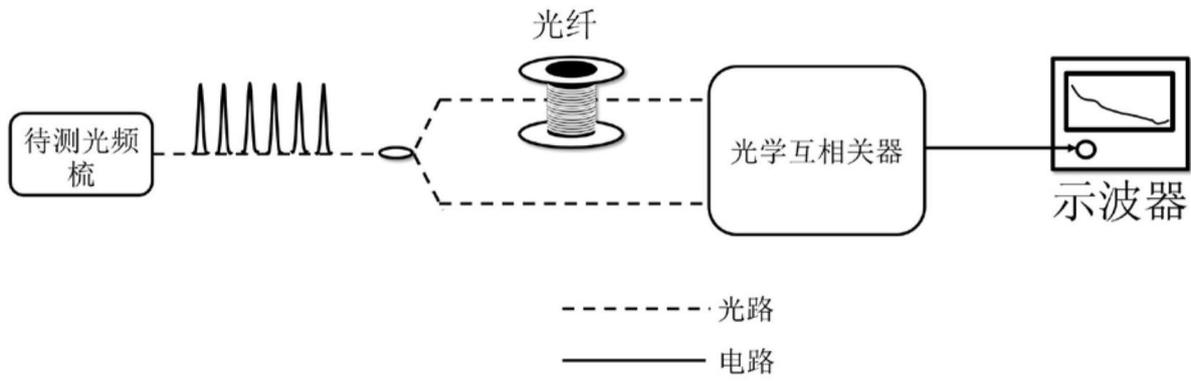


图5

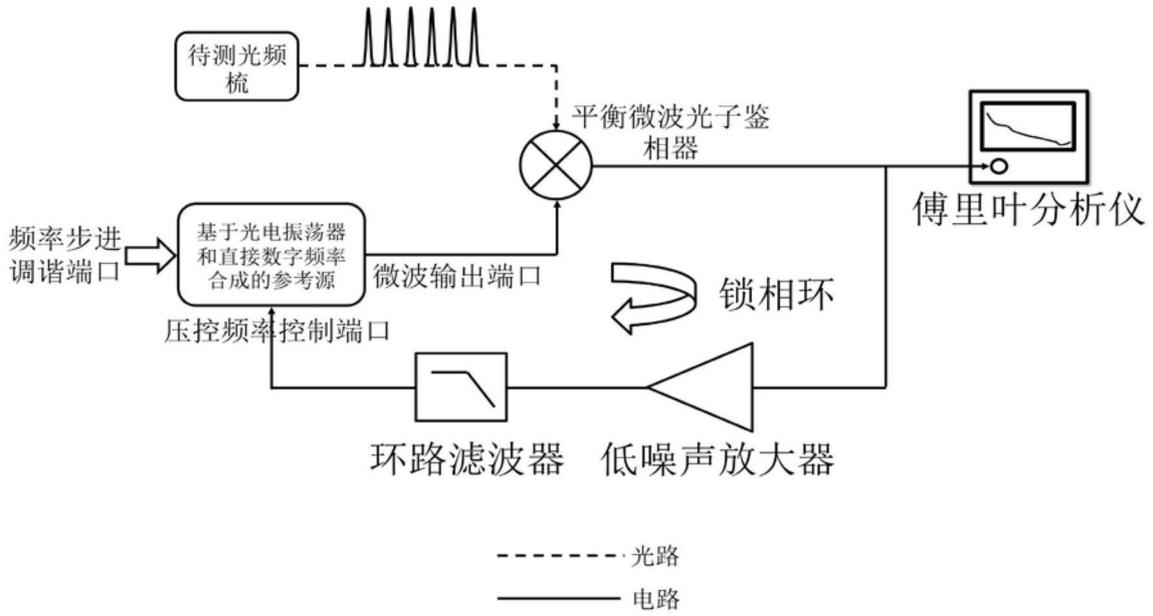


图6

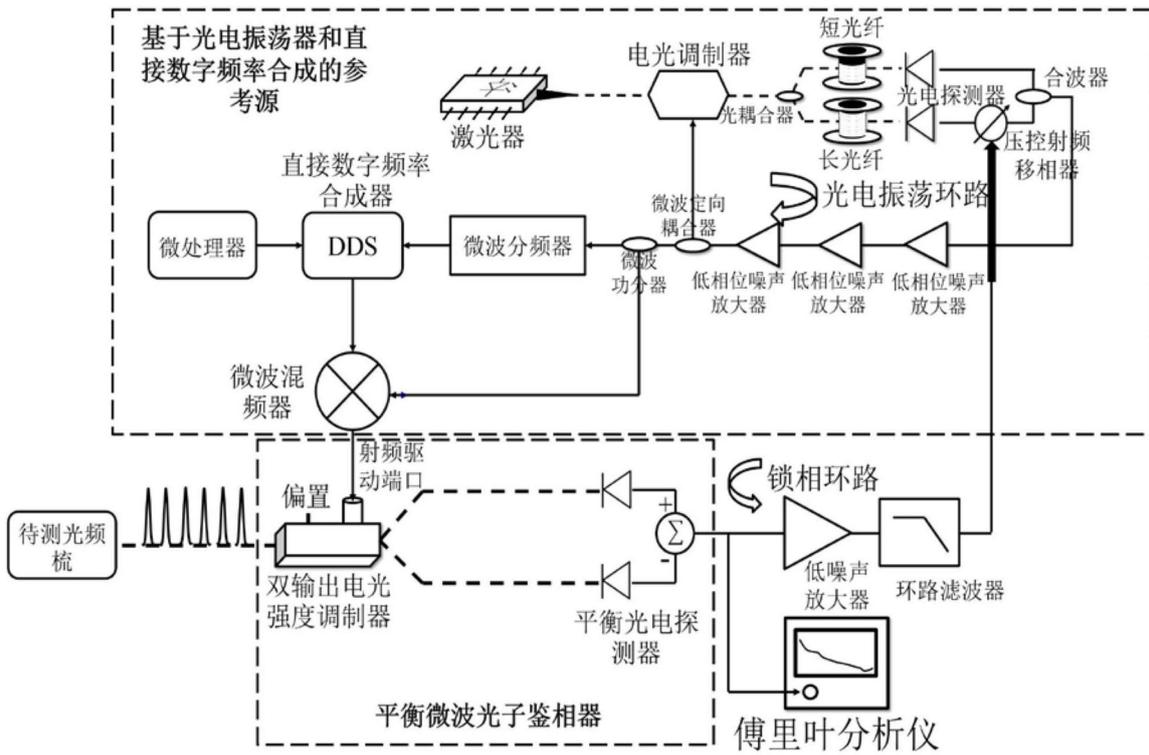


图7

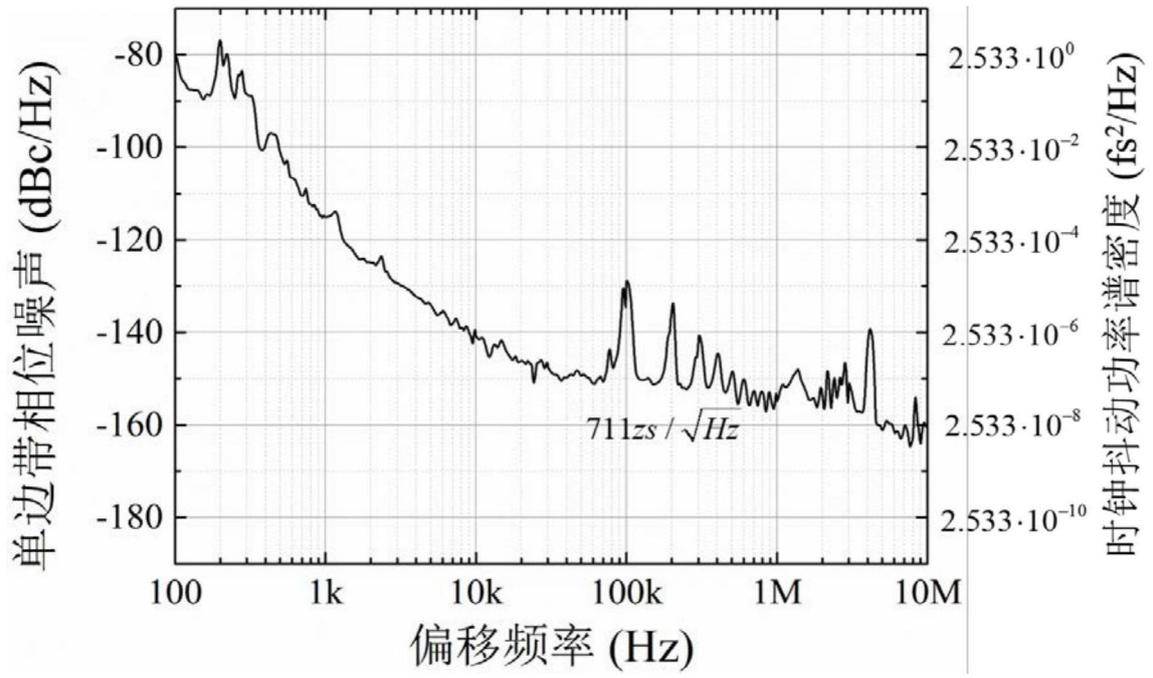


图8