



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112129491 B

(45) 授权公告日 2021.08.24

(21) 申请号 202011145214.X

G01M 11/02 (2006.01)

(22) 申请日 2020.10.23

H04B 10/079 (2013.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112129491 A

审查员 陈英杰

(43) 申请公布日 2020.12.25

(73) 专利权人 南京航空航天大学  
地址 210000 江苏省南京市江宁区将军大道29号

(72) 发明人 王祥传 刘熙 潘时龙 王立晗  
汤晓虎

(74) 专利代理机构 北京德崇智捷知识产权代理有限公司 11467

代理人 杨楠

(51) Int. Cl.

G01M 11/00 (2006.01)

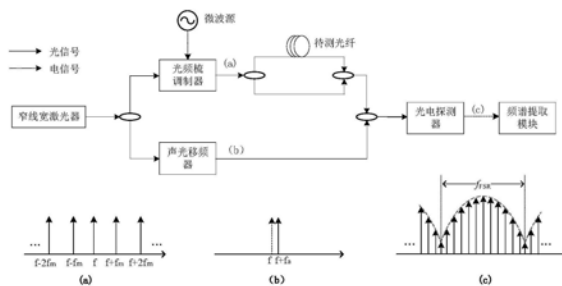
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法及装置

(57) 摘要

本发明公开了一种基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法,将窄线宽激光器输出的光载波分为两路,其中一路光载波经由光频梳调制器调制为光频梳信号后,送入接有待测光纤的干涉仪,另一路光载波进行移频处理;将移频处理后的光载波与干涉仪输出的光信号耦合后进行光电探测,得到携带时延信息的微波信号;将所述微波信号的频谱信息提取出来,再从中提取出干涉频谱的自由频谱范围,并根据干涉频谱的自由频谱范围解算出待测光纤的时延。本发明还公开了一种基于单光频梳干涉的光纤时延测量装置。相比现有技术,本发明具有测量稳定度高,测量速度快,结构简单,实现成本低的优点。



1. 基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法,其特征在于,将窄线宽激光器输出的光载波分为两路,其中一路光载波经由光频梳调制器调制为光频梳信号后,送入接有待测光纤的干涉仪,另一路光载波进行移频处理;将移频处理后的光载波与干涉仪输出的光信号耦合后进行光电探测,得到携带时延信息的微波信号;将所述微波信号的频谱信息提取出来,再从中提取出干涉频谱的自由频谱范围,并根据干涉频谱的自由频谱范围解算出待测光纤的时延。

2. 如权利要求1所述基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法,其特征在于,通过调节所述光频梳信号的梳齿间隔来调整时延测量的测量范围和测量精度。

3. 如权利要求1所述基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法,其特征在于,所述根据自由频谱范围解算出待测光纤的时延,具体采用下式:

$$\Delta\tau = \frac{l}{f_{FSR}} - \tau_0$$

其中,  $\Delta\tau$  为待测光纤的时延,  $\tau_0$  为所述干涉仪两臂的初始时延差,  $f_{FSR}$  为干涉频谱的自由频谱范围。

4. 如权利要求1所述基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法,其特征在于,所述将所述微波信号的频谱信息提取出来,具体为先用示波器或采集卡采集所述微波信号的时域信息,然后利用快速傅立叶变换将所述时域信息转换为频域信息。

5. 如权利要求1所述基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法,其特征在于,所述干涉频谱的自由频谱范围,具体为所述微波信号的频域信息中相邻波峰或相邻波谷之间的频率差。

6. 基于单光频梳干涉的光纤时延测量装置,其特征在于,包括:

光载波模块,用于将窄线宽激光器输出的光载波分为两路;

光频梳调制器,用于将其中一路光载波调制为光频梳信号并送入接有待测光纤的干涉仪;

移频模块,用于对另一路光载波进行移频处理;

光探测器,用于对移频处理后的光载波与干涉仪输出的光信号的耦合光信号进行光电探测,得到携带时延信息的微波信号;

频谱提取模块,用于将所述微波信号的频谱信息提取出来,再从中提取出干涉频谱的自由频谱范围;

解算模块,用于根据干涉频谱的自由频谱范围解算出待测光纤的时延。

7. 如权利要求6所述基于单光频梳干涉的光纤时延测量装置,其特征在于,通过调节所述光频梳信号的梳齿间隔来调整该测量装置的测量范围和测量精度。

8. 如权利要求6所述基于单光频梳干涉的光纤时延测量装置,其特征在于,解算模块根据自由频谱范围解算出待测光纤的时延,具体采用下式:

$$\Delta\tau = \frac{l}{f_{FSR}} - \tau_0$$

其中,  $\Delta\tau$  为待测光纤的时延,  $\tau_0$  为所述干涉仪两臂的初始时延差,  $f_{FSR}$  为干涉频谱的自由频谱范围。

9. 如权利要求6所述基于单光频梳干涉的光纤时延测量装置,其特征在于,所述将所述微波信号的频谱信息提取出来,具体为先用示波器或采集卡采集所述微波信号的时域信息,然后利用快速傅立叶变换将所述时域信息转换为频域信息。

10. 如权利要求6所述基于单光频梳干涉的光纤时延测量装置,其特征在于,所述干涉频谱的自由频谱范围,具体为所述微波信号的频域信息中相邻波峰或相邻波谷之间的频率差。

## 基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法及装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种光纤时延测量方法,属于光测量技术领域。

### 背景技术

[0002] 时延是信号产生、传输、控制与处理中的基础参量,随着光纤类电子信息系统的快速发展,对光纤链路中时延进行快速稳定地测量和控制成为光控相控阵、分布式雷达网络和光纤时频传输等高性能信息系统研究和应用的关键。

[0003] 常用的光纤时延测量方法主要有脉冲法、相推法、扫频干涉法三种。脉冲法又称为时域法,通过直接记录发射光脉冲信号与接收光脉冲信号的时间间隔得到待测光纤时延。脉冲法通常以光纤中脉冲的后向散射信号为接收信号,但后向散射信号较弱,系统信噪比不高,精度受限,而受色散等非线性效应限制,脉冲能量不能无限提高;同时脉冲传输时也会逐渐展宽,因此脉冲法精度不高,常为米量级。相推法利用传输时相位变化解算光纤时延,精度较高,但是在利用较高频率的微波信号进行测量时,由于高频鉴相器的匮乏,需要采用上、下变频,易引入额外的噪声,带来误差。另外为获得整周模糊度实现绝对时延测量,需对微波信号进行扫频,不仅提高了系统成本和复杂度,也限制了该方法的测量速度。扫频干涉法又称为频域法,利用连续扫描的激光器和干涉结构,可获得较高的精度,但受限于激光器的线宽和扫频的线性度,精度在厘米量级,且价格昂贵;此外,也可以利用光谱域白光干涉法和相干光干涉条纹计数法实现基于干涉结构的光纤时延测量,光谱域白光干涉法往往采用波长扫描光源,并在光纤干涉仪的输出端使用光电探测器来探测干涉光强,通过分析干涉光谱得到光纤时延(Xu F,Ren D,Shi X,et al.High-sensitivity Fabry-Perot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm[J].Optics Letters,2012,37(2):133-135.)但是这种方法不适合某些含有窄带滤波器的光纤系统时延的测量,且算法处理较为复杂;而干涉条纹计数法通过观察干涉条纹间距测量测量时延,此类方法结构复杂实现难度大,常用于空间光的时延测量。

[0004] 光频梳因包含众多频率分量,且各分量间隔相同稳定而受到高精度测量领域的青睐,在光时延测量方面也已引入了光频梳,但现有技术多采用双光梳测量的方式。常见方法如美国国家标准技术研究院(NIST)提出的利用测量重频差很小的双光梳经过干涉仪后的相位差实现高精度光时延测量(Coddington I,Swann W C,Nenadovic L,et al.Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J].Nature Photonics,2009,3(6):351-356.),清华大学的朱泽斌通过双光梳利用合成波长法及其相位信息得到了皮秒级精度的时延测量结果(Zhu Z,Xu G,Ni K,et al.Synthetic-wavelength-based dual-comb interferometry for fast and precise absolute distance measurement [J].Optics Express,2018,26(5):5747-5757.)。此类测量方法需要对两个光梳进行锁定避免环境影响带来的漂移,结构复杂且成本较高,且只能应用在空间光绝对距离测量中,测量范围均比较小。而单光梳也在空间测距中表现出了较好的优势,韩国科学技术院(KAIST)利用一种Sagnac干涉仪结构结合锁相反馈,利用锁模激光器产生光频梳信号,测量出微波

信号与光频梳信号的时延差,实现了亚飞秒级的时延测量准确度(Na Y, Jeon C-G, Ahn C, et al. Ultrafast, sub-nanometre-precision and multifunctional time-of-flight detection[J]. Nature Photonics, 2020, 14 (6) :355-360.) 由于光频梳信号与微波信号的周期性,此类测量方法测量范围偏小,仅在毫米级。另外由于采用了反馈机制,在Sagnac干涉环路需要加入玻片与法拉第旋转镜以实现 $\pi/2$ 相差,玻片的位置易变动,在测量前均需调节玻片校准,操作难度大;干涉环路也必须使用高成本的保偏光纤;此外为了达到稳定的测量结果,该方案还需使用高质量的压控振荡器与锁模激光器。综上,该单光梳时延测量系统结构复、对设备要求高、操作难度大,测量范围小,目前只能用于空间光测量中,不适合用于光纤中时延测量。

## 发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题在于克服现有技术不足,提供一种基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法,避免了双光梳干涉方案中需要的复杂锁相结构,具有测量稳定度高,测量速度快,结构简单,实现成本低的优点。

[0006] 本发明具体采用以下技术方案解决上述技术问题:

[0007] 基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法,将窄线宽激光器输出的光载波分为两路,其中一路光载波经由光频梳调制器调制为光频梳信号后,送入接有待测光纤的干涉仪,另一路光载波进行移频处理;将移频处理后的光载波与干涉仪输出的光信号耦合后进行光电探测,得到携带时延信息的微波信号;将所述微波信号的频谱信息提取出来,再从中提取出干涉频谱的自由频谱范围,并根据干涉频谱的自由频谱范围解算出待测光纤的时延。

[0008] 进一步地,通过调节所述光频梳信号的梳齿间隔来调整时延测量的测量范围和测量精度。

[0009] 优选地,所述根据自由频谱范围解算出待测光纤的时延,具体采用下式:

$$[0010] \quad \Delta\tau = \frac{l}{f_{FSR}} - \tau_0$$

[0011] 其中,  $\Delta\tau$  为待测光纤的时延,  $\tau_0$  为所述干涉仪两臂的初始时延差,  $f_{FSR}$  为干涉频谱的自由频谱范围。

[0012] 优选地,所述将所述微波信号的频谱信息提取出来,具体为先用示波器或采集卡采集所述微波信号的时域信息,然后利用快速傅立叶变换将所述时域信息转换为频域信息。

[0013] 优选地,所述干涉频谱的自由频谱范围,具体为所述微波信号的频域信息中相邻波峰或相邻波谷之间的频率差。

[0014] 基于同一发明构思还可以得到以下技术方案:

[0015] 基于单光频梳干涉的光纤时延测量装置,包括:

[0016] 光载波模块,用于将窄线宽激光器输出的光载波分为两路;

[0017] 光频梳调制器,用于将其中一路光载波调制为光频梳信号并送入接有待测光纤的干涉仪;

[0018] 移频模块,用于对另一路光载波进行移频处理;

[0019] 光探测器,用于对移频处理后的光载波与干涉仪输出的光信号的耦合光信号进行

光电探测,得到携带时延信息的微波信号;

[0020] 频谱提取模块,用于将所述微波信号的频谱信息提取出来,再从中提取出干涉频谱的自由频谱范围;

[0021] 解算模块,用于根据干涉频谱的自由频谱范围解算出待测光纤的时延。

[0022] 进一步地,通过调节所述光频梳信号的梳齿间隔来调整该测量装置的测量范围和测量精度。

[0023] 优选地,解算模块根据自由频谱范围解算出待测光纤的时延,具体采用下式:

$$[0024] \quad \Delta\tau = \frac{1}{f_{FSR}} - \tau_0$$

[0025] 其中, $\Delta\tau$ 为待测光纤的时延, $\tau_0$ 为所述干涉仪两臂的初始时延差, $f_{FSR}$ 为干涉频谱的自由频谱范围。

[0026] 优选地,所述将所述微波信号的频谱信息提取出来,具体为先用示波器或采集卡采集所述微波信号的时域信息,然后利用快速傅立叶变换将所述时域信息转换为频域信息。

[0027] 优选地,所述干涉频谱的自由频谱范围,具体为所述微波信号的频域信息中相邻波峰或相邻波谷之间的频率差。

[0028] 相比现有技术,本发明技术方案具有以下有益效果:

[0029] (1) 测量速度快、不需扫频,一次性完成测量。本发明采用光频梳调制器同时产生具有大量频率分量的光信号,且频率间隔可由调制信号调整,解决了传统干涉测长系统中需不断扫频以获取干涉仪的自由频谱范围导致测量速度慢的难题。

[0030] (2) 系统稳定性高。本发明提出的干涉仪构中参考臂与测量臂中信号源于同一个光频梳,避免了光频梳受环境影响导致的频率漂移造成的影响。

[0031] (3) 灵活性高。本发明利用外调制的方式实现频梳间隔可调的光频梳,通过控制调制的微波信号,实现光频梳间隔的灵活控制,从而达到控制系统测量范围和精度的目的。

[0032] (4) 扩展性强。干涉仪可以是马赫曾德尔(MZI)干涉仪的结构,也可以是迈克尔逊干涉仪的结构。

## 附图说明

[0033] 图1为本发明一个具体实施例的结构原理示意图;

[0034] 图2为传统光干涉时延测量系统的原理示意图。

## 具体实施方式

[0035] 针对现有技术不足,本发明的解决思路是将光频梳信号作为干涉仪的输入光源,利用光频梳中丰富的频率分量代替传统干涉仪系统中的扫频过程,极大提升测量速度;进入干涉仪两臂的信号来自同一个光频梳信号,避免了光频梳受环境影响导致的频率漂移造成的影响;同时采用外差式接收将干涉信号的频谱信息从光域映射到电域上,利用相对低频电域上高精度的频谱测量方式精确获得干涉信号的自由频谱范围 $f_{FSR}$ ,进而解算出待测光纤时延。

[0036] 本发明所提出基于单光频梳干涉的光纤时延测量方法,具体如下:

[0037] 将窄线宽激光器输出的光载波分为两路,其中一路光载波经由光频梳调制器调制为光频梳信号后,送入接有待测光纤的干涉仪,另一路光载波进行移频处理;将移频处理后的光载波与干涉仪输出的光信号耦合后进行光电探测,得到携带时延信息的微波信号;将所述微波信号的频谱信息提取出来,再从中提取出干涉频谱的自由频谱范围,并根据干涉频谱的自由频谱范围解算出待测光纤的时延。

[0038] 本发明基于单光频梳干涉的光纤时延测量装置,包括:

[0039] 光载波模块,用于将窄线宽激光器输出的光载波分为两路;

[0040] 光频梳调制器,用于将其中一路光载波调制为光频梳信号并送入接有待测光纤的干涉仪;

[0041] 移频模块,用于对另一路光载波进行移频处理;

[0042] 光探测器,用于对移频处理后的光载波与干涉仪输出的光信号的耦合光信号进行光电探测,得到携带时延信息的微波信号;

[0043] 频谱提取模块,用于将所述微波信号的频谱信息提取出来,再从中提取出干涉频谱的自由频谱范围;

[0044] 解算模块,用于根据干涉频谱的自由频谱范围解算出待测光纤的时延。

[0045] 本发明测量装置的测量范围和精度也可由改变光频梳梳齿间隔灵活控制:在测量大范围时延时,干涉仪的 $f_{FSR}$ 较小,此时需要调小光频梳梳齿间隔,以此获得干涉仪的自由频谱范围;由于梳齿数量是有限的,当梳齿间隔太小时,频谱测量范围不足以覆盖整个自由频谱范围,因此梳齿间隔不能过小;而在能获得干涉仪的自由频谱范围的状态下也可以减小梳齿间隔获得更精确的 $f_{FSR}$ ,提高时延测量精度。

[0046] 为便于公众理解,下面通过一个具体实施例并结合附图来对本发明的技术方案进行详细说明:

[0047] 本实例中测量装置的结构如图1所示,包括窄线宽激光器、微波源、光频梳调制器、声光移频器、干涉仪(测量臂中接有待测光纤)、光电探测器、频谱提取模块以及若干光耦合器。窄线宽激光器输出的光载波被分为两路,其中一路光载波经由光频梳调制器调制为光频梳信号(光频梳的梳齿间隔取决于微波源输出的微波频率)后,送入接有待测光纤的干涉仪,声光移频器对另一路光载波进行移频处理;移频处理后的光载波与干涉仪输出的光信号耦合为一路后,通过光电探测器进行拍频,得到携带时延信息的微波信号;频谱提取模块将所述微波信号的频谱信息提取出来,再从中提取出干涉频谱的自由频谱范围,最终即可根据干涉频谱的自由频谱范围解算出待测光纤的时延(解算模块在图1中未示出)。

[0048] 设光载波的频率为 $f$ ,微波源频率为 $f_m$ ,声光调制器产生的移频为 $f_a$ 。在上部的光路中,利用光频梳调制器便可产生中心频率为 $f$ ,梳齿间隔为 $f_m$ 的信号,其频谱图如a处所示;在下部的光路中,经过声光调制器后,光载波的频率变为 $f+f_a$ ,其频谱图如b处所示。

[0049] 链路光耦合到一路进入光电探测器中拍频,形成外差式结构进行频谱采样,最后只留下 $f_a, f_m \pm f_a, 2f_m \pm f_a, 3f_m \pm f_a \dots$ 等电信号频率分量,将干涉频谱从高频光域转换到低频电域,其频谱如c处所示。

[0050] 设输入干涉仪的光信号为:

$$E(t) = E_1 e^{j\omega t} \quad (1)$$

[0052] 经过耦合器分为功率相等的两路,一路进入有待测光纤的测量臂,一路进入参考

臂,此后两路光信号可分别表示为:

$$[0053] \quad \begin{aligned} E_{ref} &= \frac{E_1}{\sqrt{2}} e^{j\omega(t-L_{ref}/v)} \\ E_{FUT} &= \frac{E_1}{\sqrt{2}} e^{j\omega(t-L_{FUT}/v)} \end{aligned} \quad (2)$$

[0054] 其中, $v$ 为光纤中的光速,下标“ref”、“FUT”分别表示参考臂、测量臂;再将两路信号耦合为一路,此时输出光信号功率:

$$[0055] \quad P_o \propto E \cdot E^* = \frac{E_1^2}{2} \left[ 1 + \cos \frac{\omega(L_{FUT} - L_{ref})}{v} \right] \quad (3)$$

$$[0056] \quad P_o \propto \frac{E_1^2}{2} [1 + \cos \omega(\tau_{FUT} - \tau_{ref})] = \frac{E_1^2}{2} [1 + \cos 2\pi f(\tau_{FUT} - \tau_{ref})] \quad (4)$$

[0057] 而光电流与光信号功率成正比,可得干涉信号的光强会随信号的频率周期变化,且周期由干涉仪的两臂光程差决定,其变化的频率周期就是干涉仪的自由频谱范围 $f_{FSR}$ 。

[0058] 传统方法利用调制的方式对单频光进行移频实现扫频,如图2所示,测得通过干涉仪的不同频率光的光强,得到干涉仪的自由频谱范围。而本发明利用光频梳中丰富频率分量,只需要采集一次数据便能得到不同频率光的光强,得到干涉仪的自由频谱范围,解算出待测光纤的时延。

[0059] 同时干涉仪构中参考臂与测量臂中信号源于同一个光频梳,因此避免了光频梳受环境影响导致的频率漂移对测量造成影响,极大提升了测量的稳定性。

[0060] 利用实时示波器或信号采集卡得到干涉信号的时域波形,经过傅立叶变换后得到光电流的频域信息,即频谱提取模块。提取出光电流的频谱信息后,可以发现频率强度随信号的频率呈现周期性的变化,并且这个周期等于干涉仪测量臂与参考臂的时延差的倒数,两臂初始时延差 $\tau_0$ (即未接入待测光纤时,干涉仪两臂的时延差;可在未接入待测光纤时用本发明提出的方法对干涉仪两臂时延差测量作为校准值,得到 $\tau_0$ )可以由校准得到,用测量值减去 $\tau_0$ ,便可解算得到待测光纤的时延 $\Delta\tau$ 。同时可通过改变微波源频率来实现自由频谱范围测量精度的变化,进而实现不同时延测量精度。

[0061] 解算方法具体如下:

[0062] 利用实时示波器或者高速采集卡将拍频电信号的时域波形采集下来,经过快速傅立叶变换后,得到电信号的频谱图。按电信号频率从小到大的顺序,依次找出频率强度上相邻波谷或者波峰,记下其频率间隔,即为 $f_{FSR}$ 。由于采用外差式接收,干涉仪输出信号中较小的频谱分量仍能被探测到,使采集的频谱信息更完整。

[0063] 所以可得待测光纤的时延为:

$$[0064] \quad \Delta\tau = \frac{1}{f_{FSR}} - \tau_0 \quad (5)$$

[0065] 综上所述,本发明测量装置结构简单且系统稳定强,解算过程也极为简便,因此可以实现快速高稳定的光纤时延测量。



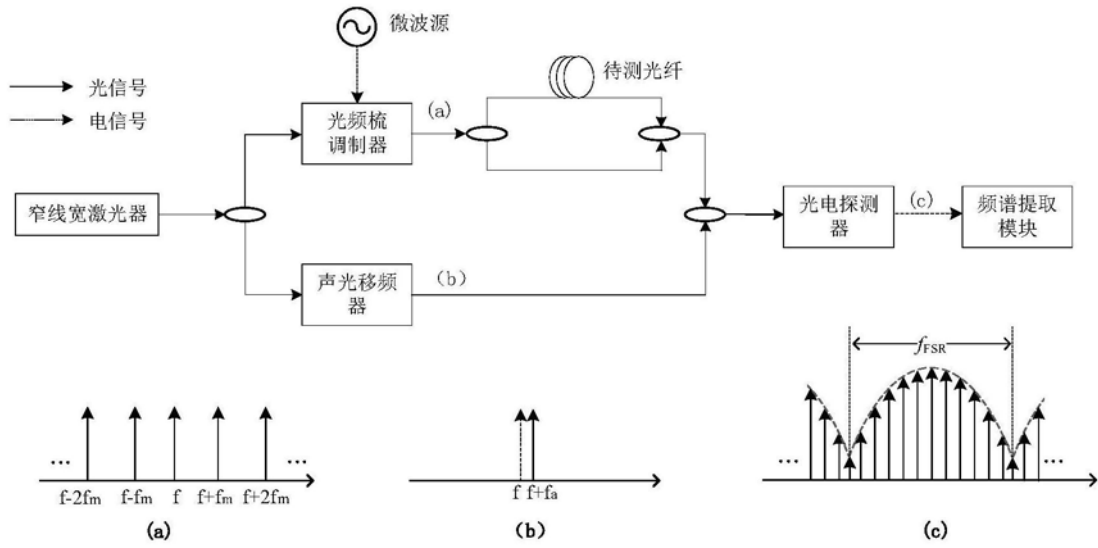


图1

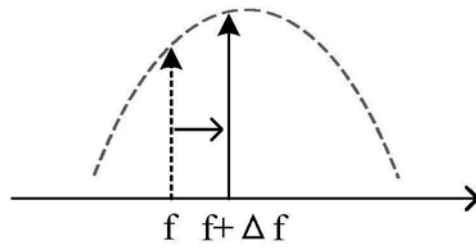


图2