

一种用于FMCW绝对距离测量技术中色散失配校正方法

申请号：[201510717190.3](#)

申请日：2015-10-29

申请(专利权)人 [哈尔滨工业大学](#)
地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街92号
发明(设计)人 [刘国栋](#) [甘雨](#) [刘炳国](#) [路程](#) [陈凤东](#) [许新科](#) [庄志涛](#)
主分类号 [G01S7/497\(2006.01\)I](#)
分类号 [G01S7/497\(2006.01\)I](#) [G01S17/36\(2006.01\)I](#)
公开(公告)号 105259548A
公开(公告)日 2016-01-20
专利代理机构 [哈尔滨市松花江专利商标事务所](#) 23109
代理人 [杨立超](#)



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105259548 A

(43) 申请公布日 2016. 01. 20

(21) 申请号 201510717190. 3

(22) 申请日 2015. 10. 29

(71) 申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

(72) 发明人 刘国栋 甘雨 刘炳国 路程
陈凤东 许新科 庄志涛

(74) 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事
务所 23109

代理人 杨立超

(51) Int. Cl.

G01S 7/497(2006. 01)

G01S 17/36(2006. 01)

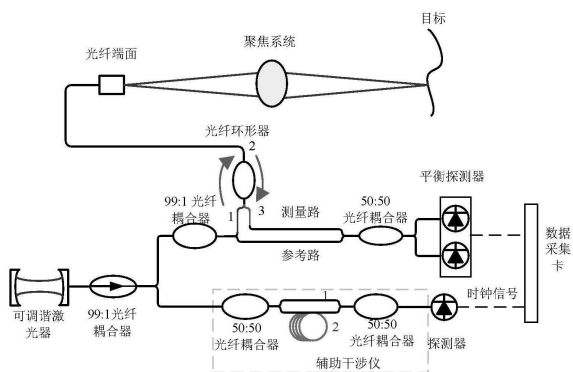
权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法

(57) 摘要

一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法, 本发明涉及色散失配校正方法。本发明是要传统的色散软件测量精度提高效果不明显的问题而提出的一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法。该方法是通过一、得到辅助干涉仪存在色散的辅助干涉仪信号 $I(f)$; 二、组成测量干涉仪信号 I_m ; 三、利用 $I_m(f)$ 计算出 $I_{end}(m)$; 四、计算得到目标反射光的干涉信号与参考光的干涉信号经辅助干涉仪采用后的数值信号 $I_m(m)$, 五、以啁啾信号的和中各啁啾信号分量的系数 $P(k)$ 作为信号的距离谱 ; 六、判断被测目标距离范围为 $R_1 \sim R_2$; 七、 $I_m(m)$ 进行分解 ; 同时对步骤四中信号的距离谱的分辨率进行优化等步骤实现的。本发明应用于色散失配校正领域。



1. 一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法,其特征在于,具体是按照以下步骤进行的:

步骤一、采用光纤搭建辅助干涉仪,得到辅助干涉仪存在色散的辅助干涉仪信号 $I(f)$;

步骤二、若以存在色散的辅助干涉仪信号 $I(f)$ 作为数据采集卡采样时钟,数据采集卡采样时钟每经过坐标轴中 0 时,得到一个采样点,采样点组成测量干涉仪信号 $I_{\text{总}}$;

其中,每一个采样点对应的激光器频率变化量为 $f(m)$;测量干涉仪信号 $I_{\text{总}}$ 分为两个部分,一部分干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考光干涉信号 $I_{\text{end}}(f)$,另一部分干涉仪测量光由端面出射,经目标反射后回到光路中与参考光干涉信号 $I_m(f)$;

步骤三、根据步骤二得到的激光器频率变化量 $f(m)$ 和步骤二的光纤端面反射光与参考光干涉信号 $I_{\text{end}}(f)$ 计算出光纤端面反射光与参考光干涉信号经辅助干涉仪采样后的数值信号 $I_{\text{end}}(m)$;

步骤四、根据步骤二得到的激光器频率变化量 $f(m)$ 与干涉信号 $I_m(f)$ 计算得到目标反射光的干涉信号与参考光的干涉信号经辅助干涉仪采样后的数值信号 $I_m(m)$,即

$$I_m(m) = A_m \cos \left[2\pi \frac{R_{\text{end}}m}{R_0} + 2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{R_m}{c} \right] \quad (11)$$

其中, A_m 为测量信号振幅, R_{end} 为干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考路之间的光程差; R_0 为辅助干涉仪两路长度差; m 为采样点序列; c 表示光速; n_{g0} 为初始频率对应的光纤群折射率; R_m 是激光在自由空间中走过的光程即待测距离; d_f 为光纤系数;

步骤五、将数值信号 $I_m(m)$ 分解为啁啾信号的和中各啁啾信号分量的系数 $P(k)$,以啁啾信号的和中各啁啾信号分量的系数 $P(k)$ 作为信号的距离谱;

其中, j 为虚部符号; $k = 1, 2 \cdots N$;

$$P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{\text{end}}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{n_{g0}R_0}{cN} k \right] \quad (15)$$

步骤六、将信号 $I_m(m)$ 进行一次傅里叶变换,判断被测目标距离范围为 $R_1 \sim R_2$;其中, R_1 为被测目标的距离的下限; R_2 为被测目标的距离的上限;

步骤七、在被测目标距离范围 $R_1 \sim R_2$ 内对信号 $I_m(m)$ 进行分解;同时对步骤四中信号的距离谱的分辨率进行优化得到被测距离 R_m ,即将公式 (15) 变化为:

$$P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{\text{end}}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{M} k + R_1 \right) \right] \quad (16)$$

其中, $k = 1, 2 \cdots M$, M 为变换点数, $(R_2 - R_1) / M$ 为距离谱的分辨率。

结合公式 (11) 和公式 (16) 可得, $P(k)$ 取最大值时,对应被测距离 R_m ,即

$$R_m = \frac{R_2 - R_1}{M} k_{\text{max}} + R_1$$

其中, k_{max} 为 $P(k)$ 最大值对应的序号。

2. 根据权利要求 1 所述一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法,其特征在于:步骤一中辅助干涉仪存在色散的辅助干涉仪信号 $I(f)$ 表示为:

$$\begin{aligned}
 I(f) &\approx A_0 \cos\left(2\pi \int_0^f \frac{n_g R_0}{c} df'\right) = A_0 \cos\left(2\pi \frac{R_0}{c} \int_0^f (d_f f' + n_{g0}) df'\right) \\
 &= A_0 \cos\left[2\pi \left(\frac{0.5d_f R_0 f^2 + n_{g0} R_0 f}{c}\right)\right]
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, f_0 为辅助干涉仪光纤的群折射率; A_0 为干涉信号振幅; f 为激光器瞬时频率变化量; n_g 为辅助干涉仪光纤群折射率。

3. 根据权利要求 2 所述一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法, 其特征在于: 步骤二中采样点由公式 (4) 得到:

$$2\pi \left(\frac{0.5d_f R_0 f^2 + n_{g0} R_0 f}{c}\right) = 2\pi m \quad m=0, 2 \cdots N-1 \quad (4)$$

其中, N 为采样点数。

4. 根据权利要求 3 所述一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法, 其特征在于: 步骤二中每一个采样点对应的激光器频率变化量 $f(m)$ 具体为:

$$f(m) = \frac{-n_{g0} R_0 \pm \sqrt{n_{g0}^2 R_0^2 + 2d_f R_0 c m}}{d_f R_0} \quad (5)$$

5. 根据权利要求 4 所述一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法, 其特征在于: 步骤二中 $I_{end}(f)$ 表示为:

$$I_{end}(f) = A_{end} \cos\left[2\pi \left(\frac{0.5d_f R_{end} f^2 + n_{g0} R_{end} f}{c}\right)\right] \quad (6)$$

其中, A_{end} 为干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考光干涉信号振幅。

6. 根据权利要求 5 所述一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法, 其特征在于: 步骤三中利用光纤端面反射光与参考光干涉信号 $I_{end}(f)$ 计算出 $I_{end}(m)$ 的具体过程为:

将公式 (5) 带入公式 (6), 则光纤端面反射光干涉信号与参考光干涉信号存在色散 $I_{end}(f)$ 经辅助干涉仪采样后变为 $I_{end}(m)$:

$$I_{end}(m) = A_{end} \cos\left(2\pi \frac{R_{end} m}{R_0}\right) \quad (7)$$

7. 根据权利要求 6 所述一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法, 其特征在于: 步骤四中 $I_m(m)$ 的具体推导过程为:

步骤四一、干涉仪测量光由端面出射, 经目标反射后回到光路中与参考光干涉信号光中 $I_m(m)$ 的自由空间中的信号光的干涉信号 $I_m(f)$ 表示为:

$$\begin{aligned}
 I_m(f) &= A_m \cos\left[2\pi \int_0^f \left(\frac{n_g R_{end} + R_m}{c}\right) df'\right] \\
 &= A_m \cos\left[2\pi \left(\frac{0.5d_f R_{end} f^2 + n_{g0} R_{end} f}{c}\right) + 2\pi f \frac{R_m}{c}\right]
 \end{aligned} \quad (8)$$

步骤四二、将公式 (5) 带入公式 (8) 得目标反射光与参考光的干涉信号经辅助干涉仪采用后的数值信号：

$$I_m(m) = A_m \cos \left(2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} + 2\pi \frac{-n_{g0}R_0 + \sqrt{n_{g0}^2R_0^2 + 2d_fR_0cm}}{d_fR_0} \frac{R_m}{c} \right) \quad (9)$$

步骤四三、为了对式 (9) 进行简化, 对 $\sqrt{n_{g0}^2R_0^2 + 2d_fR_0cm}$ 进行泰勒展开并省略高阶项得：

$$\sqrt{n_{g0}^2R_0^2 + 2d_fR_0cm} \approx n_{g0}R_0 + \frac{d_fcm}{n_{g0}} - \frac{d_f^2c^2m^2}{2n_{g0}^3R_0} \quad (10)$$

步骤四四、将公式 (10) 带入公式 (9) 得：

$$I_m(m) = A_m \cos \left[2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} + 2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{R_m}{c} \right] \quad (11)。$$

一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法

技术领域

[0001] 本发明涉及色散失配校正方法,特别涉及一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法。

背景技术

[0002] 传统的色散软件校正方法有相位校正以及分数阶傅里叶变换。相位校正的方法需要先对信号的相位斜率进行拟合,分数阶傅里叶变换需要先确定变换阶数,这两者本质上没有区别。但相位斜率拟合的精度受信号影响,两次重复性实验中拟合结果都会存在不同,该相位斜率的拟合误差就会对最后的测量结果引入一个随机误差,因此现有方法可以提高测量分辨率,但对测量精度提高效果欠佳。

发明内容

[0003] 本发明的目的是为了解决传统的色散软件测量精度提高效果不明显的问题而提出的一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法。

[0004] 上述的发明目的是通过以下技术方案实现的:

[0005] 步骤一、采用光纤搭建辅助干涉仪,得到辅助干涉仪存在色散的辅助干涉仪信号 $I(f)$;

[0006] 步骤二、若以存在色散的辅助干涉仪信号 $I(f)$ 作为数据采集卡采样时钟,数据采集卡采样时钟每经过坐标轴中 0 时,得到一个采样点,采样点组成测量干涉仪信号 $I_{\text{总}}$;

[0007] 其中,每一个采样点对应的激光器频率变化量为 $f(m)$;测量干涉仪信号 $I_{\text{总}}$ 分为两个部分,一部分干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考光干涉信号 $I_{\text{end}}(f)$,另一部分干涉仪测量光由端面出射,经目标反射后回到光路中与参考光干涉信号 $I_m(f)$;

[0008] 步骤三、根据步骤二得到的激光器频率变化量 $f(m)$ 和步骤二的光纤端面反射光与参考光干涉信号 $I_{\text{end}}(f)$ 计算出光纤端面反射光与参考光干涉信号经辅助干涉仪采样后的数值信号 $I_{\text{end}}(m)$;

[0009] 步骤四、根据步骤二得到的激光器频率变化量 $f(m)$ 与干涉信号 $I_m(f)$ 计算得到目标反射光的干涉信号与参考光的干涉信号经辅助干涉仪采样后的数值信号 $I_m(m)$,即

$$[0010] \quad I_m(m) = A_m \cos \left[2\pi \frac{R_{\text{end}} m}{R_0} + 2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0} R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{R_m}{c} \right] \quad (11)$$

[0011] 其中, A_m 为测量信号振幅, R_{end} 为干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考路之间的光程差; R_0 为辅助干涉仪两路长度差; m 为采样点序列; c 表示光速; n_{g0} 为初始频率对应的光纤群折射率; R_m 是激光在自由空间中走过的光程即待测距离; d_f 为光纤系数;

[0012] 步骤五、将信号 $I_m(m)$ 分解为啁啾信号的和中各啁啾信号分量的系数 $P(k)$,以啁啾信号的和中各啁啾信号分量的系数 $P(k)$ 作为信号的距离谱;

[0013] 其中, j 为虚部符号; $k = 1, 2 \cdots N$;

$$[0014] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{n_{g0}R_0}{cN} k \right] \quad (15)$$

[0015] 步骤六、将信号 $I_m(m)$ 进行一次傅里叶变换,判断被测目标距离范围为 $R_1 \sim R_2$;其中, R_1 为被测目标的距离的下限; R_2 为被测目标的距离的上限;

[0016] 步骤七、在被测目标距离范围 $R_1 \sim R_2$ 内对信号 $I_m(m)$ 进行分解;同时对步骤四中信号的距离谱的分辨率进行优化得到被测距离 R_m ,即将公式 (15) 变化为:

$$[0017] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{M} k + R_1 \right) \right] \quad (16)$$

[0018] 其中, $k = 1, 2 \dots M$, M 为变换点数, $(R_2 - R_1)/M$ 为距离谱的分辨率。

[0019] 结合公式 (11) 和公式 (16) 可得, $P(k)$ 取最大值时,对应被测距离 R_m ,即

$$[0020] \quad R_m = \frac{R_2 - R_1}{M} k_{\max} + R_1$$

[0021] 其中, k_{\max} 为 $P(k)$ 最大值对应的序号。

[0022] 发明效果

[0023] 本发明提出了一种用于频率调制连续波 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 绝对距离测量技术中色散失配校正新的算法。由于色散导致测量结果变为一个啁啾信号,并且啁啾量随目标距离变化而变化。为了克服这一影响,本发明提出了将信号分解为一系列啁啾信号的和,以各啁啾分量的系数作为信号的距离谱,即可消除色散的影响,求出目标距离值。即

$$[0024] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{n_{g0}R_0}{cN} k \right] \quad (15)$$

$$k = 1, 2 \dots N$$

[0025] 为了降低运算量,可以先对信号进行一次傅里叶变换,大致判断目标距离范围 $R_1 \sim R_2$,然后在该范围内对信号进行分解。同时可以对距离谱的分辨率进行优化,通常有效的分辨率与信号的信噪比有关系。此时上式可以变化为

$$[0026] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{M} k + R_1 \right) \right] \quad (16)$$

$$k = 1, 2 \dots M$$

[0027] 其中, $(R_2 - R_1)/M$ 为距离谱的分辨率。该分辨率与系统固有精度之间的比值与信号信噪比有关。实验中发现该方法可以有效的消除色散带来的影响,图 2 为不同扫频范围时不进行色散校正和利用该方法进行色散校正后的距离谱,其中实线为不进行色散校正时得到的距离谱,虚线为利用该方法进行色散校正得到的距离谱。从结果中发现该方法在不同扫频范围均可以得到良好的效果。

[0028] 色散失配会对测量精度带来影响,为了验证该方法对绝对距离测量精度的提高,在不同扫频范围时,分别在不进行色散校正、利用传统方式进行色散校正以及新方法进行色散校正时进行精度分析。其中得到的不确定度 ($k = 2$) 如表一所示,结果显示该方法可

以有效的提高绝对距离测量精度。

附图说明

[0029] 图 1 为具体实施方式一提出的 FMCW 绝对距离测量技术光路结构简图；

[0030] 图 2(a) 为具体实施方式一提出的为扫频范围为 1.07THz 时不进行色散校正和利用该方法进行色散校正后的距离谱；其中实线为不进行色散校正时得到的距离谱，虚线为利用该方法进行色散校正得到的距离谱；

[0031] 图 2(b) 为具体实施方式一提出的扫频范围为 1.6THz 时不进行色散校正和利用该方法进行色散校正后的距离谱；其中实线为不进行色散校正时得到的距离谱，虚线为利用该方法进行色散校正得到的距离谱；

[0032] 图 2(c) 为具体实施方式一提出的扫频范围为 2.13THz 时不进行色散校正和利用该方法进行色散校正后的距离谱；其中实线为不进行色散校正时得到的距离谱，虚线为利用该方法进行色散校正得到的距离谱；

[0033] 图 2(d) 为具体实施方式一提出的扫频范围为 2.66THz 时不进行色散校正和利用该方法进行色散校正后的距离谱；其中实线为不进行色散校正时得到的距离谱，虚线为利用该方法进行色散校正得到的距离谱；

[0034] 图 2(e) 为具体实施方式一提出的扫频范围为 3.19THz 时不进行色散校正和利用该方法进行色散校正后的距离谱；其中实线为不进行色散校正时得到的距离谱，虚线为利用该方法进行色散校正得到的距离谱；

[0035] 图 2(f) 为具体实施方式一提出的扫频范围为 3.72THz 时不进行色散校正和利用该方法进行色散校正后的距离谱；其中实线为不进行色散校正时得到的距离谱，虚线为利用该方法进行色散校正得到的距离谱。

具体实施方式

[0036] 具体实施方式一：结合图 1 本实施方式的一种用于 FMCW 绝对距离测量技术中色散失配校正方法，具体是按照以下步骤制备的：

[0037] 激光线性调频连续波技术借助可调谐激光器大范围连续可调的特点进行测量；通常激光器无法做到绝对的线性调频，为了克服非线性调频带来的影响，目前常用的手段是频率采样法；FMCW 绝对距离测量技术光路结构简图如图 1，图 1 中利用可调谐激光器输出频率的线性调制激光辅助干涉仪得到干涉信号 I_0 表示为：

$$[0038] \quad I_0(f) = A_0 \cos(2\pi f \tau_0) \quad (1)$$

[0039] 其中， τ_0 为辅助干涉仪两路的群延迟差， A_0 为干涉信号振幅；干涉仪为一马赫泽德干涉仪；

[0040] 利用可调谐激光器输出频率线性调制激光，根据频率线性调制激光计算得到采样前测量干涉仪信号 $I_{\text{总}}$ ；测量干涉仪信号 $I_{\text{总}}$ 表示为：

$$[0041] \quad I_{\text{总}} = A_m \cos(2\pi f \tau_m) \quad (2)$$

[0042] 其中， τ_m 为测量干涉仪两路的群延迟差；

[0043] 根据干涉信号 I_0 和测量干涉仪信号 $I_{\text{总}}$ 确定干涉信号相位与测量干涉仪信号相位成正比例关系，从而消除可调谐激光器调制的非线性带来的影响，根据正比例关系确定干

涉信号 I_0 作为数据采集卡采样时钟的测量光路信号；

[0044] 步骤一、色散失配分析；由于采用光纤搭建辅助干涉仪，得到辅助干涉仪存在色散的辅助干涉仪信号 $I(f)$ ；

[0045] 步骤二、若以存在色散的辅助干涉仪信号 $I(f)$ 作为数据采集卡采样时钟，数据采集卡采样时钟每经过坐标轴中 0 时，得到一个采样点，采样点组成测量干涉仪信号 $I_{\text{总}}$ ；

[0046] 其中，每一个采样点对应的激光器频率变化量为 $f(m)$ ；FMCW 绝对距离测量系统测量干涉仪测量光即步骤二得到的测量干涉仪信号 $I_{\text{总}}$ 分为两个部分，一部分干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考光干涉信号 $I_{\text{end}}(f)$ ，另一部分干涉仪测量光由端面出射，经目标反射后回到光路中与参考光干涉信号 $I_m(f)$ ； $I_m(f)$ 光程分为两段，一段在光纤内部的信号光，一段在自由空间中的信号光；自由空间中信号光的色散很小，可以忽略；

[0047] 步骤三、根据步骤二得到的激光器频率变化量 $f(m)$ 和步骤二的光纤端面反射光与参考光干涉信号 $I_{\text{end}}(f)$ 计算出光纤端面反射光与参考光干涉信号经辅助干涉仪采样后的数值信号 $I_{\text{end}}(m)$ ；

[0048] 步骤四、根据步骤二得到的激光器频率变化量 $f(m)$ 与干涉信号 $I_m(f)$ 计算得到目标反射光的干涉信号与参考光的干涉信号经辅助干涉仪采样后的数值信号 $I_m(m)$ ，即

$$[0049] \quad I_m(m) = A_m \cos \left[2\pi \frac{R_{\text{end}}m}{R_0} + 2\pi \left(\frac{cm}{n_{g_0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g_0}^3 R_0^2} \right) \frac{R_m}{c} \right] \quad (11)$$

[0050] 其中， A_m 为测量信号振幅， R_{end} 为干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考路之间的光程差；对 $I_{\text{end}}(m)$ 进行傅里叶变换即可求得干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考路之间的光程 R_{end} ； R_0 为辅助干涉仪两路长度差； m 为采样点序列； c 表示光速； n_{g_0} 为初始频率对应的光纤群折射率； R_m 是激光在自由空间中走过的光程即待测距离； d_f 为光纤系数；

[0051] 步骤五、色散失配补偿方案；由于色散导致测量结果即步骤三中数值信号 $I_m(m)$ 变为一个啁啾信号，并且啁啾量随目标距离变化而变化；为了克服这一影响，将信号 $I_m(m)$ 分解为啁啾信号的和中各啁啾信号分量的系数 $P(k)$ ，以啁啾信号的和中各啁啾信号分量的系数 $P(k)$ 作为信号的距离谱，即可消除色散的影响；

[0052] 其中， j 为虚部符号； $k = 1, 2 \cdots N$ ；

$$[0053] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{\text{end}}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g_0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g_0}^3 R_0^2} \right) \frac{n_{g_0}R_0}{cN} k \right] \quad (15)$$

[0054] 步骤六、为了降低运算量，将信号 $I_m(m)$ 进行一次傅里叶变换，判断被测目标距离范围为 $R_1 \sim R_2$ ；其中， R_1 为被测目标的距离的下限； R_2 为被测目标的距离的上限；

[0055] 步骤七、在被测目标距离范围 $R_1 \sim R_2$ 内对信号 $I_m(m)$ 进行分解；同时对步骤四中信号的距离谱的分辨率进行优化得到被测距离 R_m ，通常有效的分辨率与信号的信噪比有关系；即将公式 (15) 变化为：

$$[0056] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{\text{end}}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g_0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g_0}^3 R_0^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{M} k + R_1 \right) \right] \quad (16)$$

[0057] 其中， $k = 1, 2 \cdots M$ ， M 为变换点数， $(R_2 - R_1)/M$ 为距离谱的分辨率；该分辨率与系统固有精度之间的比值与信号信噪比有关；结合公式 (11) 和公式 (16) 可得， $P(k)$ 取最大值

时,对应被测距离 R_m ,即

$$[0058] \quad R_m = \frac{R_2 - R_1}{M} k_{\max} + R_1.$$

[0059] 其中 k_{\max} 为公式 (16) 最大值对应的序号;

[0060] 实验中发现该方法可以有效的消除色散带来的影响,图 2(a) ~ (f) 为不同扫频范围时不进行色散校正和利用该方法进行色散校正后的距离谱,其中实线为不进行色散校正时得到的距离谱,虚线为利用该方法进行色散校正得到的距离谱;

[0061] 从表结果中发现本实施方式在不同扫频范围均可以得到良好的效果;色散失配会对测量精度带来影响,为了验证该方法对绝对距离测量精度的提高,在不同扫频范围时,分别在不进行色散校正、利用传统方式进行色散校正以及新方法进行色散校正时进行精度分析;其中得到的不确定度 ($k = 2$) 如表一所示,结果显示该方法可以有效的提高绝对距离测量精度;

[0062]

| 扫频范围 (THz) | 测量不确定度 (μm) ($k = 2$) | | |
|---------------|--------------------------------------|--------------|------|
| | 未进行色散 校正 | 传统色散校正 方法 | 新方法 |
| 1.07 | 7.78 | 8.76 | 7.92 |
| 1.33 | 7.38 | 8.36 | 7.76 |
| 1.60 | 7.34 | 8.18 | 7.01 |
| 1.86 | 7.14 | 7.64 | 6.84 |
| 2.13 | 8.44 | 7.06 | 6.44 |
| 2.40 | 88.6 | 4.32 | 5.82 |

[0063]

| | | | |
|------|------|------|------|
| 2.66 | 93.4 | 5.71 | 5.04 |
| 2.93 | 91.0 | 5.15 | 4.40 |
| 3.19 | 110 | 4.72 | 3.58 |
| 3.46 | 48.8 | 4.42 | 2.78 |
| 3.72 | 84.2 | 4.37 | 2.34 |
| 3.99 | 104 | 4.22 | 1.68 |
| 4.26 | 99.6 | 4.32 | 1.48 |

[0064] 本实施方式效果:

[0065] 本实施方式提出了一种用于频率调制连续波 FMCW (Frequency Modulated

Continuous Wave) 绝对距离测量技术中色散失配校正新的算法。由于色散导致测量结果变为一个啁啾信号,并且啁啾量随目标距离变化而变化。为了克服这一影响,本实施方式提出了将信号分解为一系列啁啾信号的和,以各啁啾分量的系数作为信号的距离谱,即可消除色散的影响,求出目标距离值。即

$$[0066] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{n_{g0}R_0}{cN} k \right] \quad (15)$$

$$k = 1, 2 \dots N$$

[0067] 为了降低运算量,可以先对信号进行一次傅里叶变换,大致判断目标距离范围 $R_1 \sim R_2$, 然后在该范围内对信号进行分解。同时可以对距离谱的分辨率进行优化,通常有效的分辨率与信号的信噪比有关系。此时上式可以变化为

$$[0068] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{M} k + R_1 \right) \right] \quad (16)$$

$$k = 1, 2 \dots M$$

[0069] 其中, $(R_2 - R_1)/M$ 为距离谱的分辨率。该分辨率与系统固有精度之间的比值与信号信噪比有关。实验中发现该方法可以有效的消除色散带来的影响,图 2 为不同扫频范围时不进行色散校正和利用该方法进行色散校正后的距离谱,其中实线为不进行色散校正时得到的距离谱,虚线为利用该方法进行色散校正得到的距离谱。从结果中发现该方法在不同扫频范围均可以得到良好的效果。

[0070] 色散失配会对测量精度带来影响,为了验证该方法对绝对距离测量精度的提高,在不同扫频范围时,分别在不进行色散校正、利用传统方式进行色散校正以及新方法进行色散校正时进行精度分析。其中得到的不确定度 ($k = 2$) 如表一所示,结果显示该方法可以有效的提高绝对距离测量精度。

[0071] 具体实施方式二:本实施方式与具体实施方式一不同的是:步骤一中辅助干涉仪存在色散的辅助干涉仪信号 $I(f)$ 表示为:

$$[0072] \quad I(f) \approx A_0 \cos \left(2\pi \int_0^f \frac{n_g R_0}{c} df' \right) = A_0 \cos \left(2\pi \frac{R_0}{c} \int_0^f (d_f f' + n_{g0}) df' \right) \quad (3)$$

$$= A_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{0.5d_f R_0 f^2 + n_{g0} R_0 f}{c} \right) \right]$$

[0073] 其中, f_0 时辅助干涉仪光纤的群折射率; A_0 为干涉信号振幅; f 为激光器瞬时频率变化量; n_g 为辅助干涉仪光纤群折射率。其它步骤及参数与具体实施方式一相同。

[0074] 具体实施方式三:本实施方式与具体实施方式一或二不同的是:步骤二中采样点由公式 (4) 得到:

$$[0075] \quad 2\pi \left(\frac{0.5d_f R_0 f^2 + n_{g0} R_0 f}{c} \right) = 2\pi m \quad m=0, 2 \dots N-1 \quad (4)$$

[0076] 其中, N 为采样点数。其它步骤及参数与具体实施方式一或二相同。

[0077] 具体实施方式四:本实施方式与具体实施方式一至三之一不同的是:步骤二中每一个采样点对应的激光器频率变化量 $f(m)$ 具体为:

$$[0078] \quad f(m) = \frac{-n_{g0}R_0 \pm \sqrt{n_{g0}^2R_0^2 + 2d_fR_0cm}}{d_fR_0} \quad (5)$$

[0079] 其中,加法代表频率增加,减法代表频率减小。其它步骤及参数与具体实施方式一至三之一相同。

[0080] 具体实施方式五:本实施方式与具体实施方式一至四之一不同的是:步骤二中利用 FMCW 绝对距离测量系统测量干涉仪测量光的光纤端面反射光干涉信号与参考光干涉信号存在色散 $I_{end}(f)$ 表示为:

$$[0081] \quad I_{end}(f) = A_{end} \cos \left[2\pi \left(\frac{0.5d_fR_{end}f^2 + n_{g0}R_{end}f}{c} \right) \right] \quad (6)$$

[0082] 其中, A_{end} 为干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考光干涉信号振幅。其它步骤及参数与具体实施方式一至四之一相同。

[0083] 具体实施方式六:本实施方式与具体实施方式一至五之一不同的是:步骤三中利用光纤端面反射光与参考光干涉信号 $I_{end}(f)$ 计算出 $I_{end}(m)$ 的具体过程为:

[0084] 将公式 (5) 带入公式 (6),则光纤端面反射光干涉信号与参考光干涉信号存在色散 $I_{end}(f)$ 经辅助干涉仪采样后变为 $I_{end}(m)$:

$$[0085] \quad I_{end}(m) = A_{end} \cos \left(2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} \right) \quad (7) \text{。其它步骤及参数与具体实施方式一至五}$$

之一相同。

[0086] 具体实施方式七:本实施方式与具体实施方式一至六之一不同的是:步骤四中 $I_m(m)$ 的具体推导过程为:

[0087] 步骤四一、干涉仪测量光由端面出射,经目标反射后回到光路中与参考光干涉信号光中 $I_m(m)$ 的自由空间中的信号光的干涉信号 $I_m(f)$ 表示为:

$$[0088] \quad \begin{aligned} I_m(f) &= A_m \cos \left[2\pi \int_0^f \left(\frac{n_g R_{end} + R_m}{c} \right) df' \right] \\ &= A_m \cos \left[2\pi \left(\frac{0.5d_fR_{end}f^2 + n_{g0}R_{end}f}{c} \right) + 2\pi f \frac{R_m}{c} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

[0089] 步骤四二、将公式 (5) 带入公式 (8) 得目标反射光与参考光的干涉信号经辅助干涉仪采用后的数值信号:

$$[0090] \quad I_m(m) = A_m \cos \left(2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} + 2\pi \frac{-n_{g0}R_0 + \sqrt{n_{g0}^2R_0^2 + 2d_fR_0cm}}{d_fR_0} \frac{R_m}{c} \right) \quad (9)$$

[0091] 步骤四三、为了对式 (9) 进行简化,对 $\sqrt{n_{g0}^2R_0^2 + 2d_fR_0cm}$ 进行泰勒展开并省略高阶项得:

$$[0092] \quad \sqrt{n_{g0}^2R_0^2 + 2d_fR_0cm} \approx n_{g0}R_0 + \frac{d_fcm}{n_{g0}} - \frac{d_f^2c^2m^2}{2n_{g0}^3R_0} \quad (10)$$

[0093] 步骤四四、将公式 (10) 带入公式 (9) 得:

$$[0094] \quad I_m(m) = A_m \cos \left[2\pi \frac{R_{\text{end}} m}{R_0} + 2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0} R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{R_m}{c} \right] \quad (11).$$

其它步骤及参数与具体实施方式一至六之一相同。

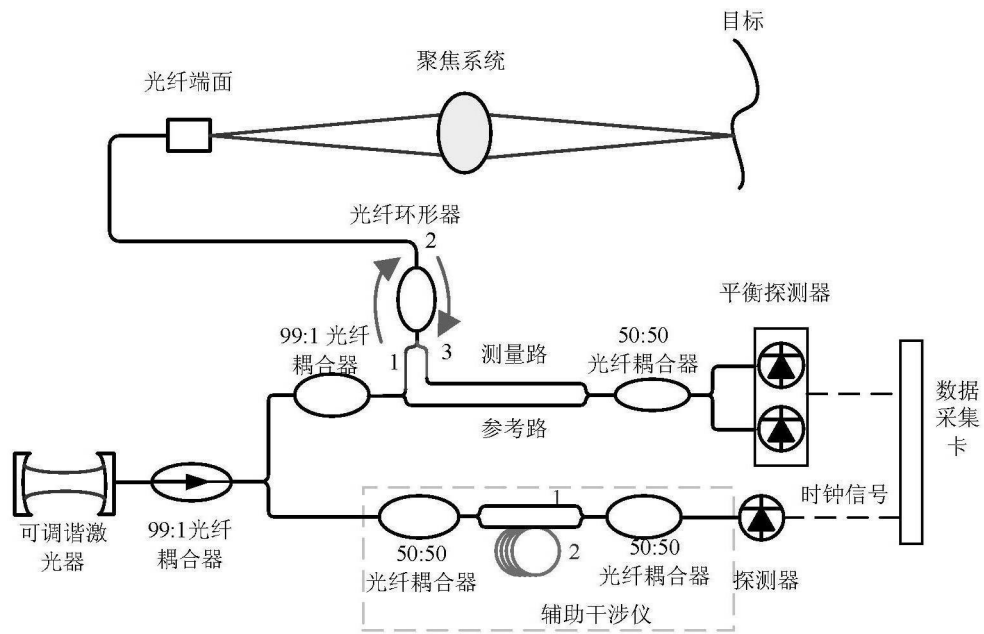


图 1

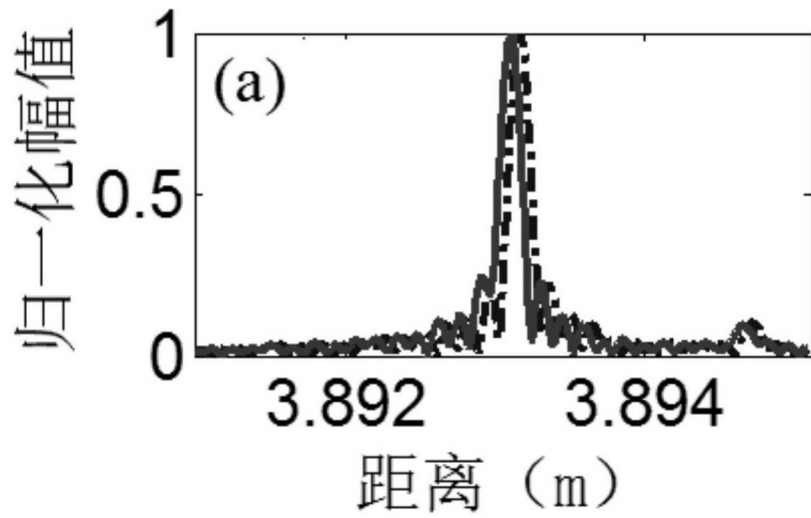


图 2(a)

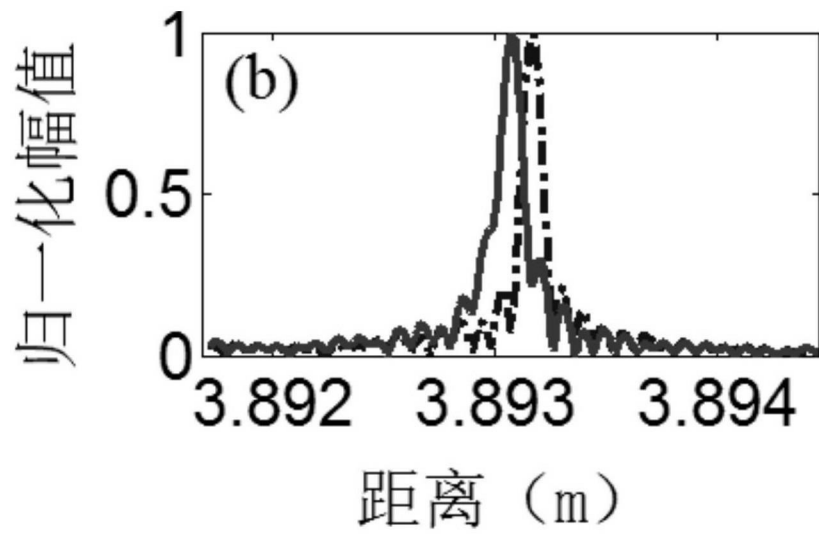


图 2(b)

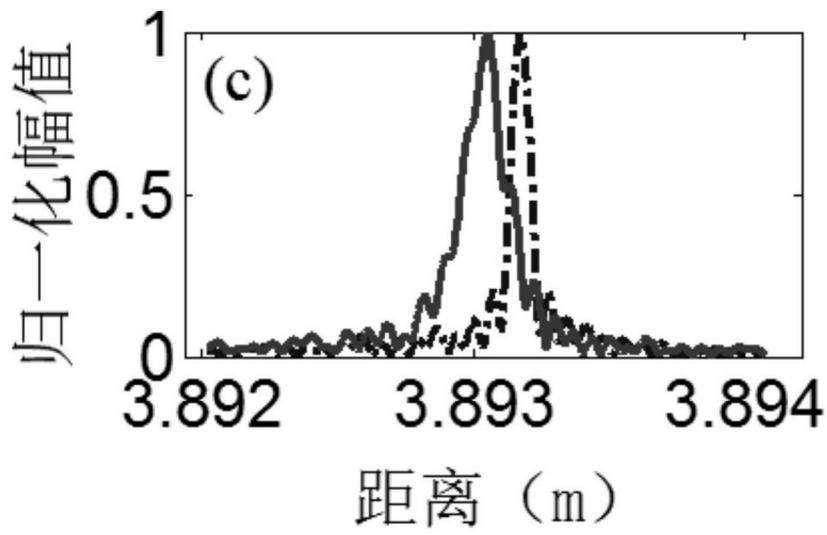


图 2(c)

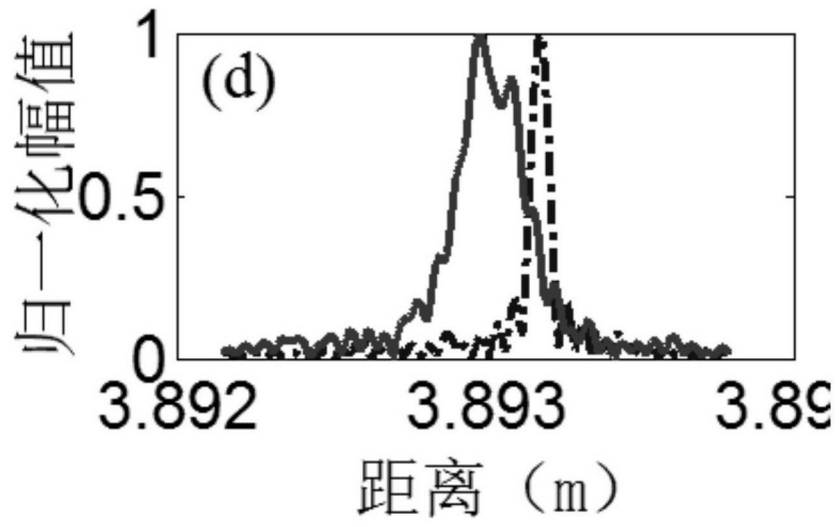


图 2(d)

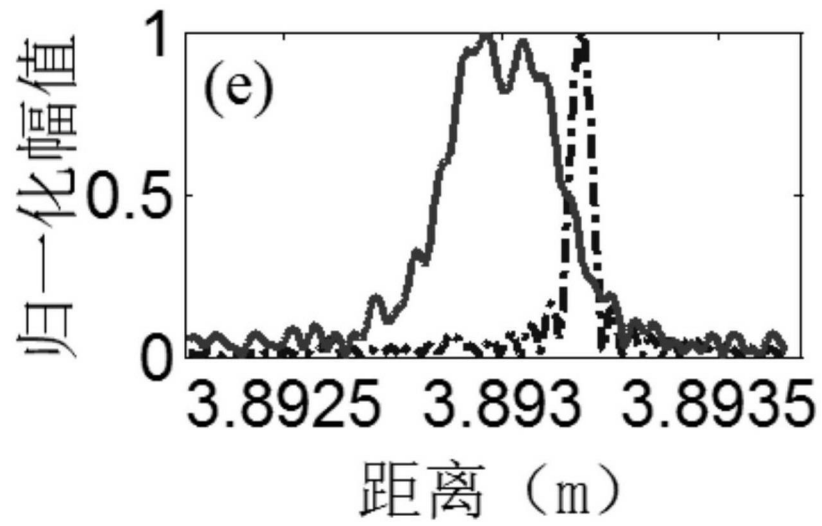


图 2(e)

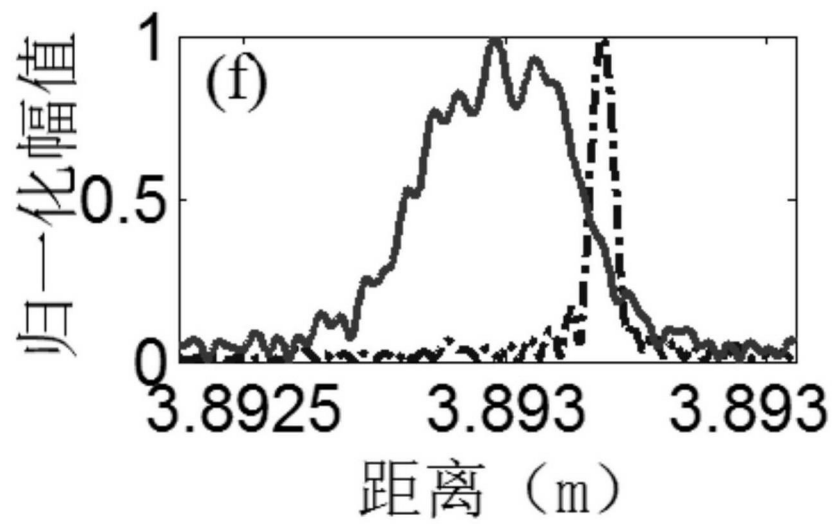


图 2(f)