



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105182000 B

(45)授权公告日 2018.05.22

(21)申请号 201510292513.9

(22)申请日 2015.05.30

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105182000 A

(43)申请公布日 2015.12.23

(73)专利权人 浙江大学

地址 310027 浙江省杭州市西湖区浙大路
38号

(72)发明人 卢乾波 娄树旗 焦旭芬 白剑

(74)专利代理机构 杭州求是专利事务有限公
司 33200

代理人 张法高

(51)Int.Cl.

G01P 15/093(2006.01)

(56)对比文件

CN 204832242 U, 2015.12.02,

CN 103175992 A, 2013.06.26,

US 2004237648 A1, 2004.12.02,

CN 102426268 A, 2012.04.25,

审查员 李佳

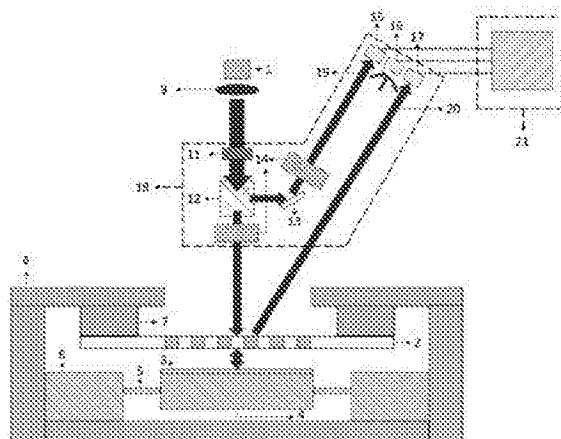
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54)发明名称

光学MEMS加速度计中三光路信号补偿系统
及其方法

(57)摘要

本发明公开了一种光学MEMS加速度计中三光路信号补偿系统及其方法,包括三光路补偿光路和后续信号处理系统;其中三光路补偿光路包含光隔离器、微型分光棱镜、平面反射镜、可调衰减器、光电探测器;补偿信号处理系统包含三个模数转换AD转换模块,减法器,除法器,数据存储求和平均模块、乘法器,以上模块均由一个可编程数字信号处理器实现。本发明结构相对简单,可有效降低由于光源自身功率波动和环境光对输出信号的影响,相比采用具有很高功率稳定性激光器的方案可以有效降低光学MEMS加速度计的成本。而且该系统和方法能够有效应用于光学MEMS加速度计中,减小其输出信号的扰动,最终提高加速度测量零偏稳定性和精度。



1. 一种光学MEMS加速度计中三光路信号补偿系统,其特征在于,包含由各光学元件组成的三光路补偿光路和补偿信号处理系统;三光路补偿光路与补偿信号处理系统相连,且补偿信号处理系统中的输入信号为从三光路补偿光路中输出的光强信号;

所述的三光路补偿光路包含信号光路、参考光路和环境光检测光路三个光路,信号光路包含顺次放置的垂直腔表面发射激光器(1)、激光准直模块、光隔离器(11)、微型分光棱镜(12),由衍射光栅(2)和反射金属膜(3)构成的光学位移传感系统,以及放置于光学位移传感系统一级干涉衍射光束出射方向上的信号光路光电探测器(17);参考光路同样包含顺次放置的所述垂直腔表面发射激光器(1)、所述激光准直模块、所述光隔离器(11)、所述微型分光棱镜(12),以及放置于分光棱镜反射光轴上的微型平面反射镜(13),一个可调衰减器(14),以及一个与所述信号光路光电探测器(17)临近放置的参考光路光电探测器(15);环境光检测光路包含一个与上述两个探测器相邻放置的环境光路光电探测器(16);

所述补偿信号处理系统包含由DSP实现的AD转换模块(22),两个减法器(23)、一个除法器(24)、一个乘法器(26),以及一个数据存储求和平均模块(25),

AD转换模块(22)接收信号光路光电探测器(17)的输入信号A、参考光路光电探测器(15)的参考信号B、环境光路光电探测器(16)的环境光信号C,并与两个减法器(23)相连,两个减法器(23)分别输出A和B与环境光信号C的差分量A-C和B-C;这两个减法器(23)的输出信号又作为除法器(24)的输入,且其中一个减法器的输出信号B-C还是数据存储求和平均模块(25)的输入信号,除法器(24)和数据存储求和平均模块(25)又同时与一个乘法器(26)相连,所述补偿信号处理系统与原光学MEMS加速度计的补偿信号处理系统集成在一起,在完成信号补偿后可进行后续信号处理。

2. 如权利要求1所述的信号补偿系统,其特征在于,三光路补偿光路中三个光电探测器的受光面与从光栅出射的一级衍射光垂直,且三者放置间距小于5mm。

3. 如权利要求1所述的信号补偿系统,其特征在于,所述光学MEMS加速度计中光栅的一级衍射角为 θ ,三光路补偿光路中参考光路上放置的平面反射镜与分光棱镜出射光的夹角为 $45^\circ - \theta$,放置距离调整至参考光路反射光与信号光间距小于5mm且不会遮挡信号光。

4. 一种如权利要求1所述补偿系统的三光路信号补偿修正方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一、垂直腔表面发射激光器(1)发出一束激光,激光频率为670nm,经过准直和衰减后的激光束通过光隔离器(11)入射到微型分光棱镜(12)上;

步骤二、激光束经过微型分光棱镜(12)后分为测量光束和参考光束,测量光束进入信号光路,参考光束进入参考光路;

步骤三、测量光束经过由衍射光栅(2)和反射金属膜(3)构成的光学位移传感系统入射到信号光路光电探测器(17)上,经过光电转换后形成输出信号A;

步骤四、参考光束经微型平面反射镜(13)反射后,通过可调衰减器(14)调整将其光强调整为合适值,入射到参考光路光电探测器(15)上,经过光电转换后形成参考信号B;

步骤五、在测量过程中利用环境光路光电探测器(16)实时探测环境光和杂散光强,经光电转换后形成环境光信号C;

步骤六、将输入信号A、参考信号B和环境光信号C输入到基于DSP的补偿信号处理系统中

步骤七、利用补偿信号处理系统对上述三个信号进行AD转换；

步骤八、分别将AD转换后的输入信号A、参考信号B与环境光信号C通过减法器(23)进行差分运算；

步骤九、利用除法器(24)对两路差分信号进行除法运算并且利用数据存储求和平均模块(25)对参考信号B与环境光信号C的差分信号进行时间积分和平均运算；

步骤十、利用乘法器(26)将从除法器(24)和数据存储求和平均模块(25)中输出的两路信号进行相乘,得到最终的补偿修正信号(27)。

5.如权利要求4所述的补偿修正方法,其特征在于,测量过程中需要联调可调衰减器(14)使得入射到信号光路光电探测器(17)的入射光强与参考光路光电探测器(15)检测到的参考光强相同。

光学MEMS加速度计中三光路信号补偿系统及其方法

技术领域

[0001] 本发明涉及加速度计中的一种信号补偿系统和方法,特别涉及光学MEMS加速度计中一种抑制由光源本身功率波动和环境光造成的信号扰动的三光路信号补偿系统及其补偿方法。

背景技术

[0002] 加速度计是一种测量物体加速度的传感器,其基本测量原理是基于牛顿第二定理的,加速度计将加速度转化为弹性结构中质量块的位移量,该位移量与输入加速度大小有着确定的关系,通过测量该位移量即可获得输入加速度的大小。因此加速度计通常包含机械加速度敏感系统和位移测量系统,加速度的测量灵敏度和加速度计的噪声由这两个系统同时决定。

[0003] 对于一个高精度的加速度计,一个能与MEMS加速度敏感结构高度集成的高精度位移测量系统是必须的。具体的说,对于光学MEMS加速度计,其MEMS加速度敏感结构是由一个敏感质量块与四个悬臂梁构成的弹性元件,质量块上表面镀高反射的金膜充当反射镜;位移测量系统是由激光光源(VCSEL激光器)、镀金膜的质量块上表面和置于质量块上方的衍射光栅构成的。当有外界加速度输入时,MEMS加速度敏感结构中的质量块会沿着加速度计敏感轴方向上下移动,产生的位移量与输入加速度大小成正比;在保证光栅和质量块上表面平行的情况下,沿光栅法线方向入射激光束,部分光会直接产生反射式衍射,另一部分光穿过光栅并在质量块上表面发生反射,回到光栅后发生透射式衍射,两种衍射光束衍射角相同,两衍射光发生干涉后的干涉场光强会随着质量块上表面和光栅的位移发生变化,通过光电探测器检出干涉光强的变化量即可检测出质量块的位移量,从而获得输入加速度值。由于干涉场光强对质量块位移变化量非常敏感且具有相对较低的噪声,因此该种光学位移测量系统拥有很高的测量精度,其精度可达纳米级,相应的原光学MEMS加速度计的加速度测量精度达到 $10\mu\text{g}$ 量级。

[0004] 为了进一步提高光学MEMS加速度计的加速度测量精度,光学位移测量系统的测量零偏稳定性需要提高,这时系统中的很多影响因素都应被考虑。光学MEMS加速度计中的激光器存在功率波动和频率波动,在实际测量过程中,频率波动会引入干涉场的相位误差,从而对测得的位移量和加速度值产生影响,对于该误差,可以选取稳频激光器以消除和避免;激光器本身的功率波动会直接造成输出信号的扰动,常见的激光器的功率波动大小为1%量级,选用具有高功率稳定性的激光器会大大增加光学MEMS加速度计的成本。由于目前的光学MEMS加速度计在计算输入加速度值是都将输入激光光强作为一个定值,因此激光光源本身功率波动的存在会引入计算误差,该误差限制了位移测量精度和加速度测量精度的提高。而且,实际测量环境中存在的环境光和杂散光也会使输出信号发生扰动,影响测量结果,在光学位移测量系统的精度达到纳米量级时,这些影响都不能被忽略。

[0005] 因此,为了进一步提高光学MEMS加速度计的加速度测量精度,有必要提供一种减小输出信号扰动的信号补偿系统和补偿方法,该方法可有效减小激光光源本身功率波动和

环境光的影响,且结构相对简单,可与光学MEMS加速度计较好地兼容。

发明内容

[0006] 本发明提供一种应用于光学MEMS加速度计中的基于三光路补偿光路的信号补偿系统及其补偿方法,本发明的目的是为了减小光学MEMS加速度计中由激光光源本身功率波动和环境光带来的输出信号扰动,提高加速度计的零偏稳定性和加速度测量精度。

[0007] 为了达到上述目的,本发明的技术方案如下:

[0008] 一种光学MEMS加速度计中三光路信号补偿系统包含由各光学元件组成的三光路补偿光路和信号处理系统;三光路补偿光路与信号处理系统相连,且信号处理系统中的输入信号为从三光路补偿光路中输出的光强信号;

[0009] 所述的三光路补偿光路包含信号光路、参考光路和环境光检测光路三个光路,信号光路包含顺次放置的垂直腔表面发射激光器、激光准直模块、光隔离器、微型分光棱镜和可调衰减器,由衍射光栅和反射金属膜构成的光学位移传感系统,以及放置于光学位移传感系统一级干涉衍射光束出射方向上的信号光路光电探测器;参考光路同样包含顺次放置的垂直腔表面发射激光器、激光准直模块、光隔离器、微型分光棱镜,以及放置于分光棱镜反射光轴上的微型平面反射镜,一个可调衰减器,以及一个与信号光路光电探测器临近放置的参考光路光电探测器;环境光检测光路包含一个与上述两个探测器相邻放置的环境光路光电探测器;

[0010] 所述信号处理系统包含由DSP实现的AD转换模块,两个减法器、一个除法器、一个乘法器,以及一个数据存储求和平均模块,AD转换模块接受探测器的信号,并与两个减法器相连,这两个减法器又作为除法器的输入,且其中一个减法器的输出信号还是数据采集、存储和平均模块的输入信号,除法器和数据存储求和平均模块又同时与一个乘法器相连,所述信号处理系统与原光学MEMS加速度计的信号处理系统集成在一起,在完成信号补偿后可进行后续信号处理。

[0011] 三光路补偿光路中三个光电探测器的受光面与从光栅出射的一级衍射光垂直,且三者放置间距小于5mm。

[0012] 所述光学MEMS加速度计中光栅的一级衍射角为 θ ,三光路补偿光路中参考路上放置的平面反射镜与分光棱镜出射光的夹角为 $45^\circ - \theta$,放置距离调整至参考路反射光与信号光间距小于5mm且不会遮挡信号光。

[0013] 所述补偿系统的三光路信号补偿修正方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0014] 步骤一、VCSEL激光器发出一束激光,激光频率为670nm,经过准直和衰减后的激光束通过光隔离器入射到微型分光棱镜上;

[0015] 步骤二、激光束经过微型分光棱镜后分为测量光束和参考光束,测量光束进入信号光路,参考光束进入参考光路;

[0016] 步骤三、测量光束经过由衍射光栅和反射金属膜构成的光学位移传感系统入射到信号光路光电探测器上,经过光电转换后形成输出信号A;

[0017] 步骤四、参考光束经微型平面反射镜反射后,通过可调衰减器调整将其光强调整为合适值,入射到参考光路光电探测器上,经过光电转换后形成参考信号B;

[0018] 步骤五、在测量过程中利用环境光路光电探测器实时探测环境光和杂散光强,经

光电转换后形成环境光信号C;

[0019] 步骤六、将输入信号A、参考信号B和环境光信号C输入到基于DSP的补偿信号处理系统中;

[0020] 步骤七、利用补偿信号处理系统对上述三个信号进行AD转换;

[0021] 步骤八、分别将AD转换后的输入信号A、参考信号B与环境光信号C通过减法器进行差分运算;

[0022] 步骤九、利用除法器对两路差分信号进行除法运算并且利用数据存储求和平均模块对参考信号B与环境光信号C的差分信号进行时间积分和平均运算;

[0023] 步骤十、利用乘法器将从除法器和数据存储求和平均模块中输出的两路信号进行相乘,得到最终的补偿修正信号。

[0024] 测量过程中需要联调可调衰减器使得入射到原有MEMS加速度计的入射光强与探测器检测到的参考光强相同。

[0025] 设输入信号A为 $V_1 = \Gamma I_{\text{输入实际1}}$, Γ 为光电探测器的前置放大倍率,参考信号B为 $V_2 = \Gamma I_{\text{参考实际}}$,环境光信号C为 $V_3 = \Gamma I_{\text{环境}}$,在忽略信号增益的情况下,补偿修正信号可以表达为:

[0026]
$$\frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_3} \cdot \overline{V_2 - V_3}$$

[0027] 经过补偿修正的信号被输入到原光学MEMS加速度计中的信号处理系统中进行后续的处理得到修正后的加速度输出。该补偿信号消除了激光光源本身功率波动和环境光对于信号扰动的影响,提高了光学MEMS加速度计的零偏稳定性和加速度测量精度。

[0028] 本发明的有益效果是:

[0029] 1、针对高精度光学MEMS加速计设计了三光路补偿光路和相应补偿算法,大幅减小了激光光源本身功率波动和测量过程中存在的环境光对输出信号的影响,提高了加速度计的零偏稳定性、位移测量精度和加速度测量精度。

[0030] 2、设计的三光路补偿光路结构简单,可以与原有光学MEMS加速度计兼容,采用微型光学元件后可以做到高度集成;相对于采用具有高功率稳定性的激光光源的方案还具有成本较低的优点。

[0031] 3、设计的补偿信号处理系统可以由一个DSP实现,方便与原有光学MEMS加速度计的信号处理系统连接与集成。

附图说明

[0032] 图1是原有光学MEMS加速度计结构示意图;

[0033] 图2是增加了本发明提供的三光路信号补偿系统的光学MEMS加速度计结构示意图;

[0034] 图3是三光路信号补偿修正流程示意图;

[0035] 图4是原光学MEMS加速度计的初始信号及其扰动波形图;

[0036] 图5是经过补偿修正后的输出信号扰动波形图。

[0037] 图中包含VCSEL激光器1、衍射光栅2、反射金属膜3、敏感质量块4、悬臂梁5、基底6、压电陶瓷7、封装外壳8、入射激光束9、一级衍射干涉信号光10、光隔离器11、微型分光棱镜12、微型平面反射镜13、可调衰减器14、参考光路光电探测器15、环境光路光电探测器16、信

号光路光电探测器17、三光路补偿光路18、参考光19、信号光20、基于DSP的三光路补偿信号处理系统21、AD转换模块22、减法器23、除法器24、数据存储求和平均模块25、乘法器26、输出补偿修正信号27。

具体实施方式

[0038] 以下将结合附图详细说明本发明完成信号补偿修正的实施方法。

[0039] 本发明提供的三光路信号补偿系统和补偿方法是应用于一个光学MEMS加速度计的,目的是减小其由激光光源本身功率和环境光造成的输出信号扰动,从而提高零偏稳定性和加速度测量的精度。如图1所示,该光学MEMS加速度计包含VCSEL激光器1、衍射光栅2、由镀在质量块上表面的金属组成的反射镜3、敏感质量块4、悬臂梁5、基底6、压电陶瓷7和封装外壳8。激光器1用于提供测量用的670nm的激光束9,一级衍射干涉信号光10中包含了质量块4与光栅2之间位移量的变化值d信息和外界输入加速度值信息。该光学MEMS加速度计的工作原理如下:VCSEL激光器1发射出一束激光9,该激光垂直入射到衍射光栅2上,衍射光栅2的周期约为1.6μm,其中一部分激光发生反射式衍射,形成0级、±1级和±3级衍射级次;另一部分透过衍射光栅2,被反射镜3反射再次通过光栅2并发生透射式衍射,产生0级±1级和±3级衍射级次。在保证衍射光栅2平行于反射镜3的前提下,反射式衍射级次会与透射式衍射级次相干叠加形成干涉条纹,具体地说,反射式衍射的+1(-1)级次会与透射式衍射的-1(+1)级次相干叠加,形成的一级衍射干涉信号光强可以表示为:

$$[0040] \quad I_{\pm 1} = \frac{2I_{in}}{\pi^2} (1 - \cos \frac{4\pi d}{\lambda}) = \frac{4I_{in}}{\pi^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \right) = \frac{4I_{in}}{\pi^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi ma}{\lambda k} \right) \quad (1),$$

[0041] 其中 I_{in} 为光学MEMS加速度计系统的理想输入光强,m为质量块4的质量,a为外界输入的加速度,k为由质量块4、悬臂梁5和基底6组成的弹性结构的弹性系数, λ 为入射激光9的光波长。通过探测到的一级衍射干涉信号光强 $I_{\pm 1}$ 即可计算出待测的加速度值,其中n为干涉条纹数:

$$[0042] \quad a = \frac{k}{m} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \arccos \left(\frac{\pi^2 I_{\pm 1}}{2I_{in}} - 1 \right) + \frac{n\lambda}{2} \right) \quad (2)$$

[0043] 在实际测量过程中,还可以通过压电陶瓷7引入相位调制再通过相关解调来提高信噪比。但是,在计算待测加速度时,该系统是将输入光强作为一个定值来考虑的,因此,由于激光器1本身功率的波动以及环境光的影响造成的输入光强 I_{in} 的变化都会导致计算得到的加速度值偏离理想真值,也即导致了输出信号的扰动。

[0044] 如图2和图3所示,本发明通过三光路补偿系统和相关信号处理系统对原光学MEMS加速度计的输出信号进行补偿修正,减小了由于激光器1本身功率的波动以及环境光的影响造成的信号扰动,达到了提高光学MEMS加速度计零偏稳定性的目的。

[0045] 该补偿系统的工作原理和步骤如下:

[0046] 如图2所示,三光路补偿光路18包含光隔离器11、微型分光棱镜12、微型平面反射镜13、可调衰减器14、参考光路光电探测器15、环境光路光电探测器16以及信号光路光电探测器17。当激光束9经过光隔离器11入射到微型分光棱镜12上时,激光被分束,一束激光透过微型分光棱镜12作为入射到原有MEMS加速度计的入射光,经由上面提到的加速度测量过

程得到一级衍射干涉信号光20,该信号光被信号光路光电探测器17检测到并作为信号光路的输入信号 V_1 ;另一束光经微型分光棱镜12反射,再由微型平面反射镜13反射,经过可调衰减器14被参考光路光电探测器15检测到并作为参考光路的参考信号 V_2 ;同时,与探测器15、17临近放置的环境光路光电探测器16检测到环境光并得到环境光信号 V_3 ;这三个信号都被输入到基于DSP的三光路补偿信号处理系统21中进行处理。

[0047] 为了得到较好的补偿效果,需使微型分光棱镜12入射面垂直于激光束9,并使微型平面反射镜13与从微型分光棱镜12出射的反射光轴夹角成 $45^\circ-\theta$;同时,为了保证探测器15、16、17能够靠得尽可能的近,需调整三光路补偿光路18距离原光学MEMS加速度计敏感结构的距离;并且,在实际测量过程中,还需调整可调衰减器14使得入射到原有MEMS加速度计的入射光强与参考光路探测器15检测到的参考光强相同。

[0048] 如图3所示,基于DSP的三光路补偿信号处理系统21包含AD转换模块22、两个减法器23、一个除法器24、一个数据存储求和平均模块25和一个乘法器26。光电探测器17、15、16分别输入信号 V_1 、参考信号 V_2 和环境光信号 V_3 ,这三个信号经过AD转换模块22从模拟量转化为数字量,再经过两个减法器23分别输出 V_1 和 V_2 与环境光信号 V_3 的差分量, V_1-V_3 和 V_2-V_3 。这两路信号进入到除法器24中进行比例运算得到信号 $\frac{V_1-V_3}{V_2-V_3}$,而另一部分 V_2-V_3 数字信号被模块25存储下来并进行求和、平均,得到一段时间内的 V_2-V_3 的平均值 $\overline{V_2-V_3}$ 。最后通过一个乘法器26得到输出补偿修正信号为 $\frac{V_1-V_3}{V_2-V_3} \cdot \overline{V_2-V_3}$ 。由于 $V_1 = \Gamma I_{\text{输入实际1}}$, $V_2 = \Gamma I_{\text{参考实际}}$, $V_3 = \Gamma$

$I_{\text{环境3}}$,因此输出补偿信号 $\frac{V_1-V_3}{V_2-V_3} \cdot \overline{V_2-V_3} \propto \frac{I_{\text{输入实际1}}-I_{\text{环境3}}}{I_{\text{参考实际}}-I_{\text{环境3}}} \cdot \overline{I_{\text{参考实际}}-I_{\text{环境3}}}$,以此修正信号代替式(2)中的 $I_{\pm 1}$ 可以减小由激光光源本身功率波动和环境光带来的输出信号扰动,并提高加速度计的零偏稳定性和加速度测量的精度。

[0049] 下面结合附图说明为什么做这样的补偿修正能够减小由激光光源本身功率波动和环境光带来的输出信号扰动。

[0050] 如图4所示,在未加入三光路信号补偿系统前,原光学MEMS加速度计的输出信号基本符合式(1)的形式,但是在保证加速度不变的情况下对输出信号进行长时间采样,可以发现原光学MEMS加速度计的输出信号零偏稳定性不佳,信号的均方根误差(RMS)达到了8.26mV,对应的零偏稳定性为 $8.26\text{mV}/1676\text{V/g}=4.93\mu\text{g}$ 。

[0051] 假设由于激光光源本身功率波动和环境光、杂散光导致实际输入信号存在扰动,该扰动信号表达为 $I_{\text{输入实际1}} = I_{\text{输入}} + \Delta I_{\text{输入}} + I_{\text{环境1}}$,其中 $I_{\text{输入}}$ 为激光光源本身没有功率波动时的理想一级衍射干涉信号光强(同时作为后面信号处理系统的输入信号), $\Delta I_{\text{输入}}$ 为由激光光源本身功率波动 ΔI_{in} 带来的一级衍射干涉信号光强波动, $I_{\text{环境1}}$ 为信号光路探测器17接收到的环境光强。由于信号扰动造成的偏移理想加速度的值可以表示为:

$$[0052] \quad \Delta a = \frac{\lambda k}{4\pi m} \left(\begin{array}{c} \arccos \left(\frac{\pi^2 (I_{\text{输入}} + \Delta I_{\text{输入}} + I_{\text{环境1}})}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \\ - \arccos \left(\frac{\pi^2 I_{\text{输入}}}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \end{array} \right) \quad (3)$$

[0053] 如前所述,以补偿修正信号代替上式中的 $I_{\text{输入实际1}}$,可以计算出经过补偿修正后计算出的加速度值偏离理想加速度值变为:

$$[0054] \quad \Delta a = \frac{\lambda k}{4\pi m} \left(\begin{array}{c} \arccos \left(\frac{\pi^2 \frac{I_{\text{输入实际1}} - I_{\text{环境3}}}{I_{\text{参考实际}} - I_{\text{环境3}}} \cdot \frac{I_{\text{参考实际}} - I_{\text{环境3}}}{I_{\text{参考实际}} - I_{\text{环境3}}} - 1}{2I_{\text{in}}} \right) \\ - \arccos \left(\frac{\pi^2 I_{\text{输入}}}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \end{array} \right) \quad (4),$$

[0055] 其中 $I_{\text{输入实际1}} = I_{\text{输入}} + \Delta I_{\text{输入}} + I_{\text{环境1}}$, $I_{\text{参考实际}} = (I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}}) \times M + I_{\text{环境2}}$, I_{in} 为光学MEMS加速度计系统的理想输入光强, ΔI_{in} 为激光光源本身功率波动, M 为经过参考光路后入射光强的衰减因子。由于探测器15、16、17位置很接近,因此可以用环境光路探测器16探测到的光强 $I_{\text{环境3}}$ 近似代替探测器15和17探测到的环境光强 $I_{\text{环境2}}$ 和 $I_{\text{环境1}}$:

$$[0056] \quad I_{\text{环境3}} \approx I_{\text{环境1}} \approx I_{\text{环境2}} \quad (5)。$$

[0057] 在近似下,补偿修正信号可以改写为:

$$[0058] \quad \begin{aligned} & \frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_3} \cdot \frac{I_{\text{输入实际1}} - I_{\text{环境3}}}{I_{\text{参考实际}} - I_{\text{环境3}}} \propto \frac{I_{\text{输入}} + \Delta I_{\text{输入}} + I_{\text{环境1}} - I_{\text{环境3}}}{(I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}}) \times M + I_{\text{环境2}} - I_{\text{环境3}}} \cdot \frac{I_{\text{参考实际}} - I_{\text{环境3}}}{(I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}}) \times M + I_{\text{环境2}} - I_{\text{环境3}}} \\ & \approx \frac{I_{\text{输入}} + \Delta I_{\text{输入}}}{(I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}}) \times M} \cdot \frac{(I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}}) \times M}{(I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}}) \times M} \end{aligned} \quad (6)。$$

[0059] 当数据存储求和平均模块25中累积的数据足够多,也即数据的采集时间足够长时,激光光源本身功率波动的平均值可以近似为0,那么可以做另一个近似:

$$[0060] \quad \overline{(I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}}) \times M} = (I_{\text{in}} + \overline{\Delta I_{\text{in}}}) \times M \approx M I_{\text{in}} \quad (7)$$

[0061] 联调两个可调衰减器14使得衰减因子 M 为1,并将两种近似下的补偿修正信号代入式4可以计算出最终计算得到的加速度值偏离理想加速度值变为:

$$\begin{aligned}
\Delta a &= \frac{\lambda k}{4\pi m} \left(\begin{array}{c} \arccos \left(\frac{\pi^2 \frac{I_{\text{输入实际1}} - I_{\text{环境3}}}{I_{\text{参考实际}} - I_{\text{环境3}}} \cdot \overline{I_{\text{参考实际}} - I_{\text{环境3}}}}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \\ - \arccos \left(\frac{\pi^2 I_{\text{输入}}}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \end{array} \right) \\
[0062] \quad &\approx \frac{\lambda k}{4\pi m} \left(\begin{array}{c} \arccos \left(\frac{\pi^2 \frac{I_{\text{输入}} + \Delta I_{\text{输入}}}{I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}}} \cdot (I_{\text{in}} + \overline{\Delta I_{\text{in}}})}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \\ - \arccos \left(\frac{\pi^2 I_{\text{输入}}}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \end{array} \right) \\
&= \frac{\lambda k}{4\pi m} \left(\begin{array}{c} \arccos \left(\pi^2 \frac{I_{\text{输入}} + \Delta I_{\text{输入}}}{2(I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}})} - 1 \right) \\ - \arccos \left(\frac{\pi^2 I_{\text{输入}}}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \end{array} \right) \quad (8)
\end{aligned}$$

[0063] 由于光学MEMS加速度计系统是对包含有功率波动的入射光强进行整体调制得到输入探测器端的光强信号,因此有:

$$[0064] \quad \frac{I_{\text{输入}}}{I_{\text{in}}} \approx \frac{\Delta I_{\text{输入}}}{\Delta I_{\text{in}}} \rightarrow \frac{I_{\text{输入}} + \Delta I_{\text{输入}}}{I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}}} \approx \frac{I_{\text{输入}}}{I_{\text{in}}} \quad (9)$$

[0065] 由此可以从理论上推得,在进行了三光路信号补偿修正后,计算得到的加速度值偏离理想加速度的值可以减小至约等于0:

[0066]

$$\Delta a = \frac{\lambda k}{4\pi m} \left(\begin{array}{c} \arccos \left(\pi^2 \frac{I_{\text{输入}} + \Delta I_{\text{输入}}}{2(I_{\text{in}} + \Delta I_{\text{in}})} - 1 \right) \\ - \arccos \left(\frac{\pi^2 I_{\text{输入}}}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \end{array} \right) \approx \frac{\lambda k}{4\pi m} \left(\begin{array}{c} \arccos \left(\pi^2 \frac{I_{\text{输入}}}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \\ - \arccos \left(\frac{\pi^2 I_{\text{输入}}}{2I_{\text{in}}} - 1 \right) \end{array} \right) \approx 0 \quad (10)$$

[0067] 图5(a)是在某一确定输入加速度条件下差分信号 V_1-V_3 的波形图,图5(b)是差分信号 V_2-V_3 的波形图。可以看到,信号光路的信号和参考光路的信号在经过与环境光检测光路的信号差分以后,其扰动还是比较大的,均方根误差分别达到了8.60mV和8.41mV,图5(c)是经过补偿信号处理系统后的补偿修正信号波形图。如图5所示,经过本发明的三光路信号补偿系统的补偿修正后,输出信号的均方根误差减小到2.07mV,对应的零偏稳定性为1.24 μ g。

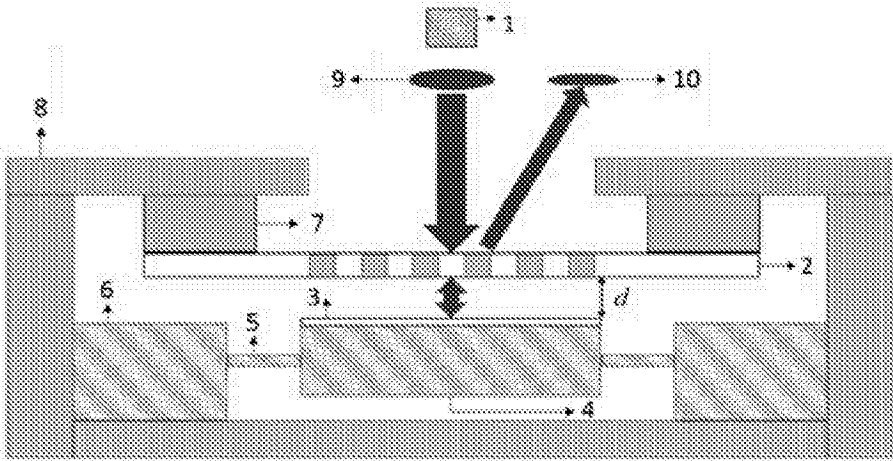


图1

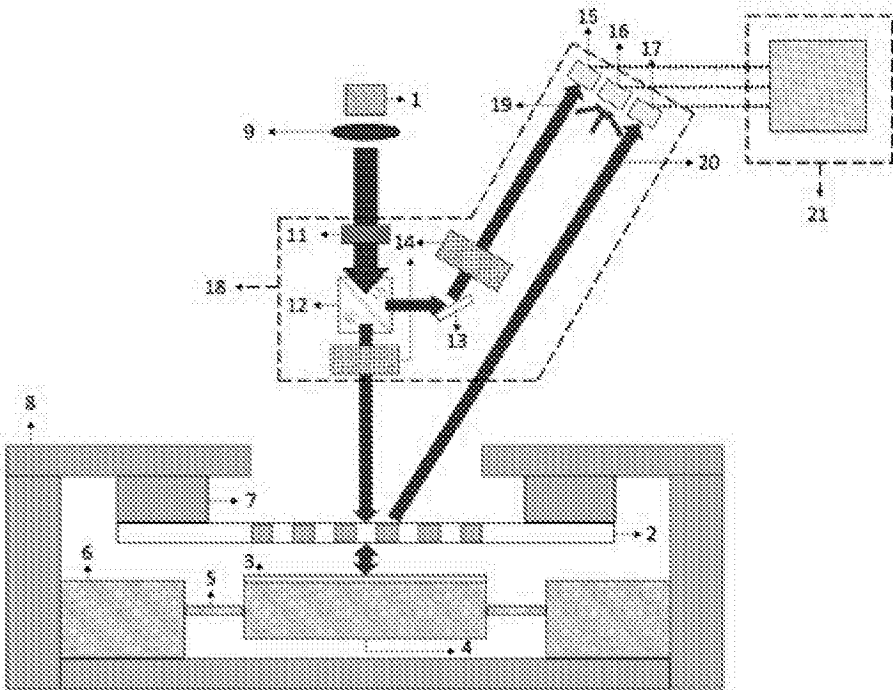


图2

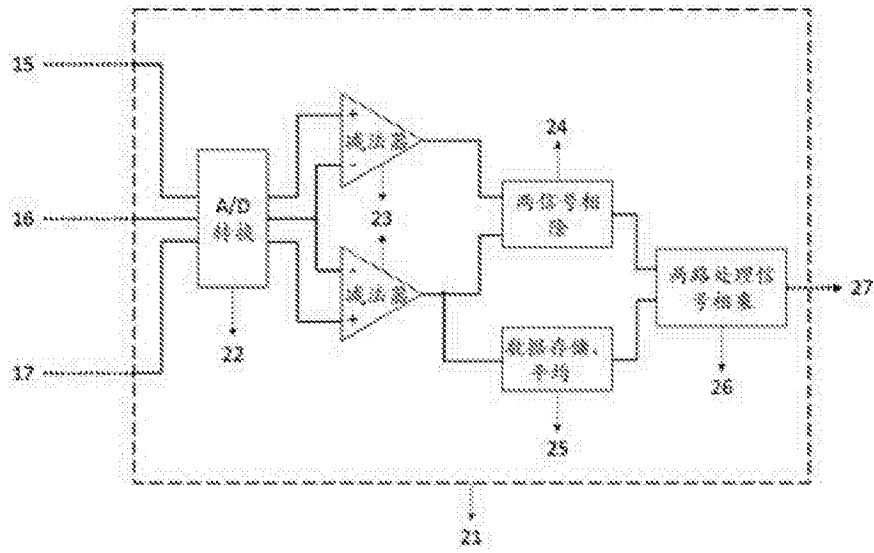


图3

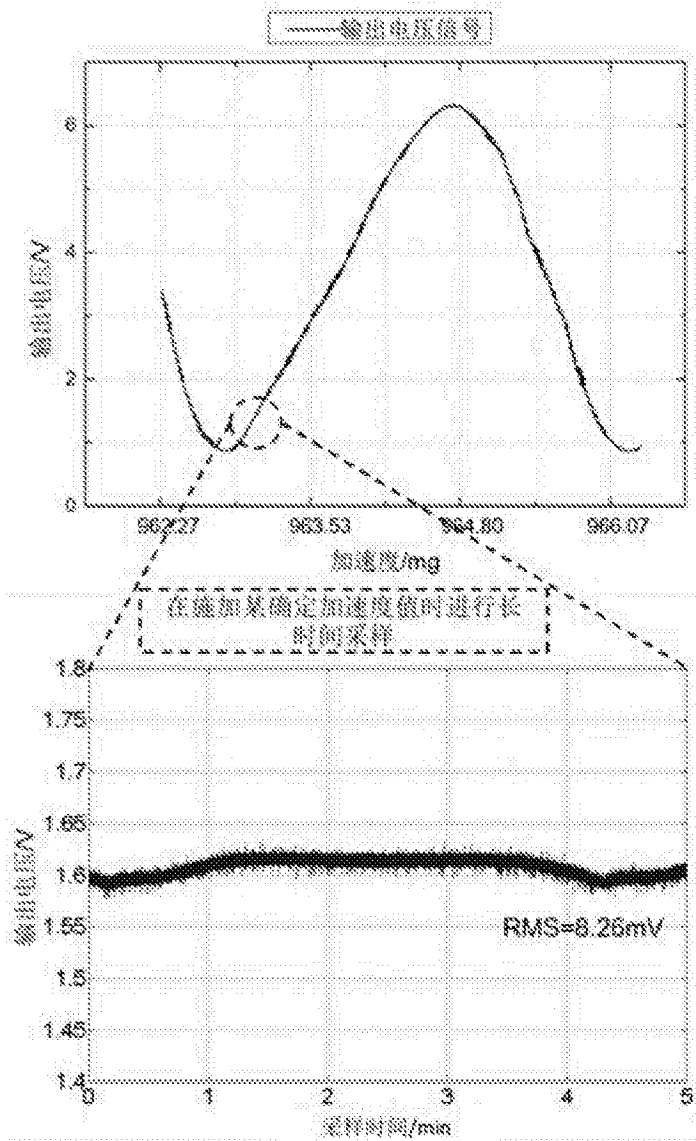


图4

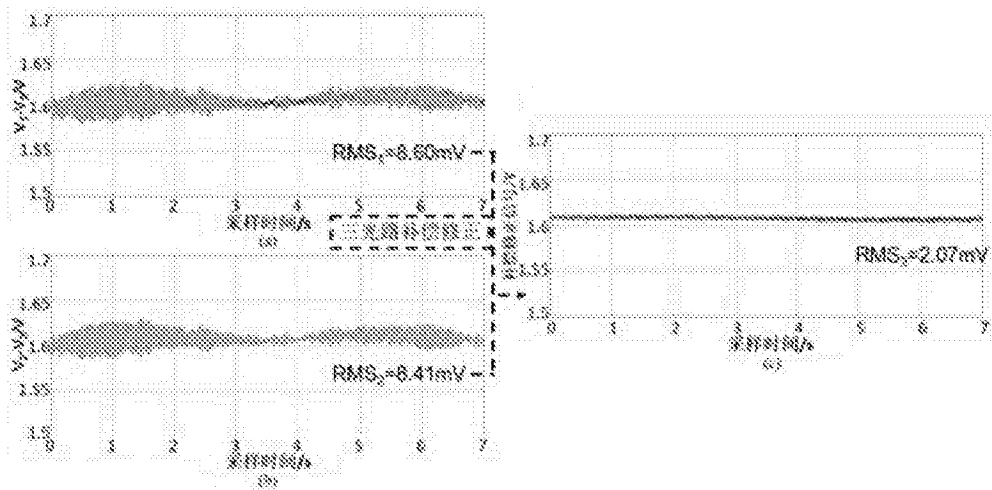


图5