



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112924721 B

(45) 授权公告日 2021.12.28

(21) 申请号 202110044996.6

(22) 申请日 2021.01.13

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112924721 A

(43) 申请公布日 2021.06.08

(73) 专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路28号

(72) 发明人 韦学勇 徐柳 徐宇涛 阳琪琪

王雪峰 宦荣华

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

代理人 高博

(51) Int. Cl.

G01P 15/097 (2006.01)

G01P 15/08 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 111157760 A, 2020.05.15

CN 107979351 A, 2018.05.01

CN 107515311 A, 2017.12.26

CN 111536994 A, 2020.08.14

CN 107064657 A, 2017.08.18

CN 105203132 A, 2015.12.30

US 2009056443 A1, 2009.03.05

US 2010263445 A1, 2010.10.21

浦东.《非线性微机械振荡器中的同步及应用》.《中国博士学位论文全文数据库》.2020, (第2期),

游建良.《毫米波注入锁定同步带宽展宽技术研究》.《安徽师范大学学报(自然科学版)》.2005, 第28卷(第1期),

Pu D等.《Anomalous amplitude-frequency dependence in a micromechanical resonator under synchronization》.《Nonlinear Dynamics》.2021, 第103卷(第1期),

Huan R等.《Effects of phase delay on synchronization in a nonlinear micromechanical oscillator》.《Applied Physics Letters》.2019, 第114卷(第23期),

审查员 吕新强

权利要求书2页 说明书8页 附图2页

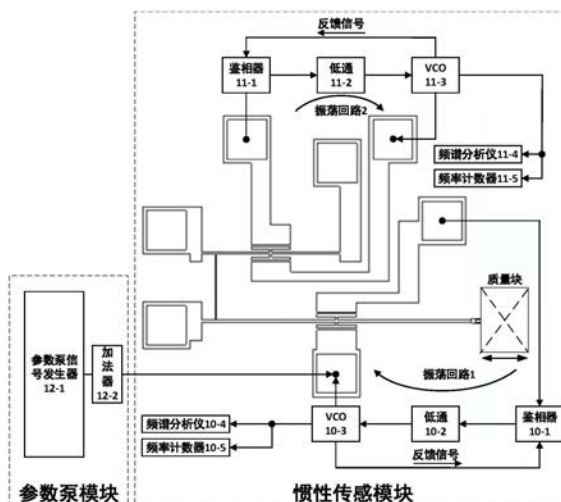
(54) 发明名称

一种基于参数泵的超谐同步带宽增强方法及系统

(57) 摘要

本发明公开了一种基于参数泵的超谐同步带宽增强方法及系统,惯性传感模块包括低频敏感梁模块和高频同步梁模块,低频敏感梁模块中的低频谐振梁与高频同步梁模块的高频谐振梁并列排布,并通过共用机械微梁机械连接,低频敏感梁和高频同步梁分别置于第一振荡回路和第二振荡回路中产生自激振荡;参数泵模块包括参数泵信号发生器,参数泵信号发生器经加法器与惯性传感模块连接,参数泵信号发生器在低频谐振梁和高频同步梁分别产生闭环振荡后,以固定的频率输出参数泵动态刚度调制信号,实现对振荡器的刚度调制。本发明超谐同步惯性传感器的检测范围、标度因子、易于实现性、灵活性、测

量精度、分辨率都得到显著提升。



CN 112924721 B

1. 一种基于参数泵的超谐同步带宽增强系统,其特征在于,包括惯性传感模块和参数泵模块,惯性传感模块包括低频谐振梁模块和高频同步梁模块,低频谐振梁模块中的低频谐振梁(1-1)与高频同步梁模块的高频同步梁(2-1)并列排布,并通过共用机械微梁(3-1)机械连接,低频谐振梁(1-1)和高频同步梁(2-1)分别置于第一振荡回路和第二振荡回路中产生自激振荡;参数泵模块包括参数泵信号发生器(12-1),参数泵信号发生器(12-1)经加法器(12-1)与惯性传感模块连接,参数泵信号发生器(12-1)在低频谐振梁(1-1)和高频同步梁(2-1)分别产生闭环振荡后,以固定的频率输出参数泵动态刚度调制信号,实现对振荡器的刚度调制;

低频谐振梁(1-1)悬置于镂空的衬底上,低频谐振梁(1-1)的左右两端分别和与衬底绝缘层固结的第一固支锚点(1-2)以及悬置的第二连接锚点(1-5)连接;

低频谐振梁(1-1)中间向外侧伸出的第一受激电极板(1-4)悬置于镂空的衬底上,第一受激电极板(1-4)的两侧分别设置第一激励电极板(4-1)和第二激励电极板(5-1)组成电容极板;

第一激励电极板(4-1)和第二激励电极板(5-1)悬置于镂空的衬底上,第一激励电极板(4-1)和第二激励电极板(5-1)分别与低频谐振器第一激励锚点(4-2)和第二激励锚点(5-2)连接;

第一固支锚点(1-2)、第一激励锚点(4-2)、第二激励锚点(5-2)上分别溅射有第一金属电极层(1-3)、第四金属电极层(4-3)和第五金属电极层(5-3),参数泵信号通过加法器(12-1),与闭环回路(1)的闭环激励信号共同施加至第四金属电极层(4-3);

参数泵信号发生器(12-1)产生的参数泵信号频率 ω_p 为:

$$\omega_p = \Delta \omega = \omega_3 - \omega_1$$

其中, ω_3 为高频同步梁的谐振频率, ω_1 为低频谐振梁的谐振频率;参数泵信号的强度 V_p 调节范围为0~5V。

2. 根据权利要求1所述的系统,其特征在于,第二连接锚点(1-5)与惯性传感模块的敏感质量块连接。

3. 根据权利要求1所述的系统,其特征在于,第一固支锚点(1-2)、第一激励锚点(4-2)和第二激励锚点(5-2)为正方形结构,边长为100~300 μm ;第一金属电极层(1-3)、第四金属电极层(4-3)和第五金属电极层(5-3)为正方形结构,边长为80~250 μm ;第一受激电极板(1-4)与第一激励电极板(4-1)和第二激励电极板(5-1)之间的间隙距离为1~10 μm 。

4. 根据权利要求1所述的系统,其特征在于,高频同步梁(2-1)悬置于镂空的衬底上,高频同步梁(2-1)的左右两端分别和与衬底绝缘层固结的第三固支锚点(2-2)以及第四固支锚点(2-5)连接;

高频同步梁(2-1)中间向外侧伸出的第二受激电极板(2-4)悬置于镂空的衬底上,第二受激电极板(2-4)的两侧对应设置第三激励电极板(6-1)和第四激励电极板(7-1)组成电容极板;

第三激励电极板(6-1)和第四激励电极板(7-1)悬置于镂空的衬底上,第三激励电极板(6-1)和第四激励电极板(7-1)分别与第三激励锚点(6-2)和第四激励锚点(7-2)连接;

第三固支锚点(2-2)、第四固支锚点(2-5)、第三激励锚点(6-2)、第四激励锚点(7-2)上分别溅射有第二金属电极层(2-3)、第三金属电极层(2-6)、第六金属电极层(6-3)和第七金

属电极层(7-3)。

5. 根据权利要求4所述的系统,其特征在于,第三固支锚点(2-2)、第四固支锚点(2-5)、第三激励锚点(6-2)和第四激励锚点(7-2)为正方形结构,边长为100~300 μm ;

第二金属电极层(2-3)、第三金属电极层(2-6)、第六金属电极层(6-3)和第七金属电极层(7-3)为正方形结构,边长为80~250 μm ;

第二受激电极板(2-4)与第三激励电极板(6-1)和第四激励电极板(7-1)之间的间隙距离为1~10 μm 。

6. 根据权利要求1所述的系统,其特征在于,第一振荡回路包括第一鉴相器(10-1)、第一低通(10-2)和第一电压控制振荡器VCO(10-3);第一鉴相器(10-1)的输入端与低频谐振梁模块的第五金属电极层(5-3)连接,输出端依次经第一低通(10-2)和第一电压控制振荡器VCO(10-3)与低频谐振梁模块的第四金属电极层(4-3)连接,第一电压控制振荡器VCO(10-3)分别连接第一频谱分析仪(10-4)和第一频率计数器(10-5),并将反馈信号发送至第一鉴相器(10-1);

第二振荡回路包括第二鉴相器(11-1)、第二低通(11-2)和第二电压控制振荡器VCO(11-3);第二鉴相器(11-1)的输入端与高频同步梁模块的第七金属电极层(7-3)连接,输出端依次经第二低通(11-2)和第二电压控制振荡器VCO(11-3)后与高频同步梁模块的第六金属电极层(6-3)连接,第二电压控制振荡器VCO(11-3)分别连接第二频谱分析仪(11-4)和第二频率计数器(11-5),并将反馈信号发送至第二鉴相器(11-1)。

7. 根据权利要求1所述的系统,其特征在于,低频谐振梁(1-1)和低频同步梁(2-1)均为双端固支的单梁,低频谐振梁(1-1)和低频同步梁(2-1)的长度为10~500 μm ,单根梁的宽度为1~10 μm ;共用机械微梁(3-1)为单梁,长度为5~10 μm ,宽度为1~5 μm 。

8. 一种基于参数泵的超谐同步带宽增强方法,其特征在于,使用权利要求1所述的基于参数泵的超谐同步带宽增强系统,当惯性传感模块受到外界加速度变化时,敏感质量的位移引起应力的变化,使得低频谐振梁(1-1)产生谐振频率的偏移;低频谐振梁(1-1)的频率信息通过共用机械微梁(3-1),以扰动力的形式传输至高频同步梁(2-1)中;当低频谐振梁的线性谐振频率 ω_1 和低频同步梁的线性谐振频率 ω_3 满足 $N = \frac{\omega_3}{\omega_1}$ 时, N 为整数,发生超谐同步效应,低频同步梁(2-1)将低频谐振梁(1-1)的频率偏移量放大 N 倍,实现标度因子成倍增大。

一种基于参数泵的超谐同步带宽增强方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于微机械系统及非线性动力学技术领域,具体涉及一种基于参数泵的超谐同步带宽增强方法及系统。

背景技术

[0002] 高精度MEMS惯性传感器,由于成本低、性能可靠以及微型化带来的高集成性,已被广泛用于军事和工业领域,例如惯性制导、国防军工、能源勘探、地震检测和智能交互式机器人等。而MEMS谐振式加速度计由于其高灵敏度、宽动态范围和准数字输出等特性,逐渐成为微加速度计领域的研究热点。目前国外实用化的谐振式加速度计对我国实施禁运,而我国的谐振式加速度计尚处于实验室阶段。随着国家经济社会的不断发展,在航空航天、国防安全等领域对高性能谐振式加速度计的需求巨大。

[0003] 目前,对于谐振式惯性传感器的研究主要集中于提高谐振式加速度计的灵敏度、分辨率和稳定性等性能。虽然现有的基于超谐同步效应的谐振式加速度计,在同步现象发生时可以实现标度因子的若干倍提升,但是由于微纳器件的设计制造误差导致的谐振频率不匹配和同步现象中频率锁定带宽较小的原因,非常难以产生同步。同时,较小的同步锁定区间也限制了加速度测量的范围,较大的加速度值就会使得同步的振荡器之间脱离同步锁定状态而独立振荡,起不到超谐同步的灵敏度放大作用。并且,由于同步振荡器在加工完成后结构参数无法改变,同步区间的大小不能通过调节耦合强度而进行灵活控制,限制了加速度检测范围的进一步扩大。同步效应严格的频率匹配要求和加速度检测范围难以扩大的问题,极大地限制了超谐同步加速度计在实际中的应用。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题在于针对上述现有技术中的不足,提供一种基于参数泵的超谐同步带宽增强方法及系统,通过对耦合系统中的振荡器施加参数泵动态刚度调制信号,介导声子和能量的传递,从而加强超谐同步振荡器之间的耦合强度,以此扩宽同步区间。基于此,使得低频敏感梁和低频同步梁在更大的频率范围内保持同步状态,实现检测范围的显著扩大。同时,由于能量交换的增强,振荡器的频率稳定性也得到相应的提升,有利于提高谐振式加速度计的分辨率和精度等性能。

[0005] 本发明采用以下技术方案:

[0006] 一种基于参数泵的超谐同步带宽增强系统,包括惯性传感模块和参数泵模块,惯性传感模块包括低频敏感梁模块和高频同步梁模块,低频敏感梁模块中的低频谐振梁与高频同步梁模块的高频谐振梁并列排布,并通过共用机械微梁机械连接,低频敏感梁和高频同步梁分别置于第一振荡回路和第二振荡回路中产生自激振荡;参数泵模块包括参数泵信号发生器,参数泵信号发生器经加法器与惯性传感模块连接,参数泵信号发生器在低频谐振梁和高频同步梁分别产生闭环振荡后,以固定的频率输出参数泵动态刚度调制信号,实现对振荡器的刚度调制。

[0007] 具体的,低频谐振梁悬置于镂空的衬底上,低频敏感梁的左右两端分别和与衬底绝缘层固结的第一固支锚点以及悬置的第二连接锚点连接;

[0008] 低频谐振梁中间向外侧伸出的第一受激电极板悬置于镂空的衬底上,第一受激电极板的两侧分别设置第一激励电极板和第二激励电极板组成电容极板;

[0009] 第一激励电极板和第二激励电极板悬置于镂空的衬底上,第一激励电极板和第二激励电极板分别与低频谐振器第一激励锚点和第二激励锚点连接;

[0010] 第一固支锚点、第一激励锚点、第二激励锚点上分别溅射有第一金属电极层、第四金属电极层和第五金属电极层。

[0011] 进一步的,第二连接锚点与惯性传感模块的敏感质量块连接。

[0012] 进一步的,第一固支锚点、第一激励锚点和第二激励锚点为正方形结构,边长为 $100\sim 300\mu\text{m}$;第一金属电极层、第四金属电极层和第五金属电极层为正方形结构,边长为 $80\sim 250\mu\text{m}$;第一受激电极板与第一激励电极板和第二激励电极板之间的间隙距离为 $1\sim 10\mu\text{m}$ 。

[0013] 具体的,高频谐振梁悬置于镂空的衬底上,高频同步梁的左右两端分别和与衬底绝缘层固结的第三固支锚点以及第四固支锚点连接;

[0014] 高频谐振梁中间向外侧伸出的第二受激电极板悬置于镂空的衬底上,第二受激电极板的两侧对应设置第三激励电极板和第四激励电极板组成电容极板;

[0015] 第三激励电极板和第四激励电极板悬置于镂空的衬底上,第三激励电极板和第四激励电极板分别与第三激励锚点和第四激励锚点连接;

[0016] 第三固支锚点、第四固支锚点、第三激励锚点、第四激励锚点上分别溅射有第二金属电极层、第三金属电极层、第六金属电极层和第七金属电极层。

[0017] 进一步的,第三固支锚点、第四固支锚点、第三激励锚点和第四激励锚点为正方形结构,边长为 $100\sim 300\mu\text{m}$;

[0018] 第二金属电极层、第三金属电极层、第六金属电极层和第七金属电极层为正方形结构,边长为 $80\sim 250\mu\text{m}$;

[0019] 第二受激电极板与第三激励电极板和第四激励电极板之间的间隙距离为 $1\sim 10\mu\text{m}$ 。

[0020] 具体的,第一振荡回路包括第一鉴相器、第一低通和第一电压控制振荡器VCO;第一鉴相器的输入端与低频敏感梁模块的第五金属电极层连接,输出端依次经第一低通和第一电压控制振荡器VCO与低频敏感梁模块的第四金属电极层连接,第一电压控制振荡器VCO分别连接第一频谱分析仪和第一频率计数器,并将反馈信号发送至第一鉴相器;

[0021] 第二振荡回路包括第二鉴相器、第二低通和第二电压控制振荡器VCO;第二鉴相器的输入端与高频同步梁模块的第七金属电极层连接,输出端依次经第二低通和第二电压控制振荡器VCO后与高频同步梁模块的第六金属电极层连接,第二电压控制振荡器VCO分别连接第二频谱分析仪和第二频率计数器,并将反馈信号发送至第二鉴相器。

[0022] 具体的,参数泵信号发生器产生的参数泵信号频率 ω_p 为:

$$[0023] \quad \omega_p = \Delta \omega = \omega_3 - \omega_1$$

[0024] 其中, ω_3 为高频同步梁的谐振频率, ω_1 为低频敏感梁的谐振频率;参数泵信号的强度 V_p 调节范围为 $0\sim 5\text{V}$ 。

[0025] 具体的,低频敏感梁和低频同步梁均为双端固支的单梁,低频敏感梁和低频同步梁的长度为 $10\sim 500\mu\text{m}$,单根梁的宽度为 $1\sim 10\mu\text{m}$;共用机械微梁3-1为单梁,长度为 $5\sim 10\mu\text{m}$,宽度为 $1\sim 5\mu\text{m}$ 。

[0026] 本发明的另一个技术方案是,一种基于参数泵的超谐同步带宽增强方法,使用权利要求1所述的基于参数泵的超谐同步带宽增强系统,当惯性传感模块受到外界加速度变化时,敏感质量的位移引起应力的变化,使得低频敏感梁产生谐振频率的偏移;低频敏感梁的频率信息通过共用机械微梁,以扰动力的形式传输至高频同步梁中;当低频敏感梁的线性谐振频率 ω_1 和同步梁的线性谐振频率 ω_3 满足 $N = \frac{\omega_3}{\omega_1}$ 时, N 为整数,发生超谐同步效应,高频同步梁将低频敏感梁的频率偏移量放大 N 倍,实现标度因子成倍增大。

[0027] 与现有技术相比,本发明至少具有以下有益效果:

[0028] 本发明提出了一种基于参数泵的超谐同步带宽增强系统,通过对耦合系统中的振荡器施加参数泵动态刚度调制信号,介导声子和能量的传递,从而增强振荡器之间耦合强度,以此扩宽超谐同步带宽并实现传感器检测范围的扩大。基于此,MEMS惯性传感器可以在更大的待测量范围内,利用超谐同步现象实现灵敏度的显著提升。并且,更大的同步带宽,解决了微纳器件谐振频率不匹配和同步现象中频率锁定带宽较小的原因带来的超谐同步现象难以实现的问题,使得超谐同步现象更加易于在工程实际中的应用。同时,通过增强参数泵信号的强度,可以进一步加强超谐同步振荡器之间的耦合强度,从而实现超谐同步传感器检测范围的灵活调节。最后,由于能量交换的增强,振荡器的频率稳定性也得到相应的提升,有利于提高谐振式加速度计的分辨率和精度等性能。

[0029] 进一步的,低频敏感梁模块的固支锚点和连接锚点对悬置的谐振元件进行必要的支撑,镂空结构保证谐振元件在激振力作用下能产生稳定振动。低频谐振器第一激励电极板位于谐振元件的一侧,与第一受激电极板构成激励可变电容,当可变电容的两侧存在交变的电压作用时,产生的交变静电力驱动低频谐振元件产生持续稳定的振动。低频谐振器第二激励电极板位于谐振元件的另一侧,与第一受激电极板构成检测可变电容,低频谐振元件在交变静电力驱动下的稳定振动位移信号转化为可变电容的动态电流信号输出,从而实时采集高频谐振元件的振动信号。金属电极层用于输入和输出电学信号。进一步的,第二连接锚点与惯性传感模块的敏感质量块连接,当敏感质量受到加速度等惯性力的作用并产生位移时,连接锚点将相应的拉伸或者压缩应变传递至与第二连接锚点相连的低频敏感梁,使其发生谐振频率的变化。

[0030] 进一步的,低频敏感梁模块和低频同步梁模块中的受激电极板与激励电极板之间形成的可变电容的间隙大小决定了激振力和检测信号的强度。间隙的距离范围设置为 $1\sim 10\mu\text{m}$,可以保证激振力的大小足以使谐振元件达到稳定振动,并且振动信号也可以准确输出。进一步的,高频同步梁模块的第三固支锚点和第四固支锚点对悬置的谐振元件进行必要的支撑,镂空结构保证谐振元件在激振力作用下能产生稳定振动。高频谐振器第三激励电极板位于谐振元件的一侧,与第二受激电极板构成激励可变电容,当可变电容的两侧存在交变的电压作用时,产生的交变静电力驱动高频谐振元件产生持续稳定的振动。高频谐振器第四激励电极板位于谐振元件的另一侧,与第二受激电极板构成检测可变电容,高频谐振元件在交变静电力驱动下的稳定振动位移信号转化为可变电容的动态电流信号输出,

从而实时采集高频谐振元件的振动信号。金属电极层用于输入和输出电学信号。

[0031] 进一步的,低频敏感梁和高频同步梁分别通过闭环振荡回路读取相应的振动频率信息,利用反馈实现谐振元件的自激振荡,保证频率信息可以被精确读取。

[0032] 进一步的,参数泵信号作用于闭环振荡系统,通过动态的刚度调制实现高低频振荡器之间的能量传递,从而增强振荡器之间耦合强度,以此扩宽超谐同步带宽并实现传感器检测范围的扩大。

[0033] 综上所述,本发明从增大超谐同步带宽、方便工程实际应用、灵活调节检测范围、提高频率稳定性四个方面,使得基于此方法的超谐同步惯性传感器的检测范围、标度因子、易于实现性、灵活性、测量精度、分辨率都得到显著提升。

[0034] 下面通过附图和实施例,对本发明的技术方案做进一步的详细描述。

附图说明

[0035] 图1为本发明的MEMS谐振式惯性力传感器结构图;

[0036] 图2为本发明测量电路结构原理图。

[0037] 其中:1-1.低频敏感梁;1-2.第一固支锚点;1-3.第一金属电极层;1-4.第一受激电极板;1-5.第二连接锚点;2-1.高频同步梁;2-2.第三固支锚点;2-3.第二金属电极层;2-4.第二受激电极板;2-5.第四固支锚点;2-6.第三金属电极层;3-1.共用机械微梁;4-1.第一激励电极板;4-2.第一激励锚点;4-3.第四金属电极层;5-1.第二激励电极板;5-2.第二激励锚点;5-3.第五金属电极层;6-1.第三激励电极板;6-2.第三激励锚点;6-3.第六金属电极层;7-1.第四激励电极板;7-2.第四激励锚点;7-3.第七金属电极层;10-1.第一鉴相器;10-2.第一低通;10-3.第一电压控制振荡器VCO;10-4.第一频谱分析仪;10-5.第一频率计数器;11-1.第二鉴相器;11-2.第二低通;11-3.第二电压控制振荡器VCO;11-4.第二频谱分析仪;11-5.第二频率计数器;12-1.参数泵信号发生器;12-2.加法器。

具体实施方式

[0038] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0039] 在本发明的描述中,需要理解的是,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此,限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括一个或者更多个该特征。在本发明的描述中,除非另有说明,“多个”的含义是两个或两个以上。

[0040] 应当理解,当在本说明书和所附权利要求书中使用时,术语“包括”和“包含”指示所描述特征、整体、步骤、操作、元素和/或组件的存在,但并不排除一个或多个其它特征、整体、步骤、操作、元素、组件和/或其集合的存在或添加。

[0041] 在本发明的描述中,需要说明的是,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或一体地连接;可以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是

两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言,可以具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0042] 还应当理解,在本发明说明书中所使用的术语仅仅是出于描述特定实施例的目的而并不意在限制本发明。如在本发明说明书和所附权利要求书中所使用的那样,除非上下文清楚地指明其它情况,否则单数形式的“一”、“一个”及“该”意在包括复数形式。

[0043] 还应当进一步理解,在本发明说明书和所附权利要求书中使用的术语“和/或”是指相关联列出的项中的一个或多个的任何组合以及所有可能组合,并且包括这些组合。

[0044] 在附图中示出了根据本发明公开实施例的各种结构示意图。这些图并非是按比例绘制的,其中为了清楚表达的目的,放大了某些细节,并且可能省略了某些细节。图中所示出的各种区域、层的形状及它们之间的相对大小、位置关系仅是示例性的,实际中可能由于制造公差或技术限制而有所偏差,并且本领域技术人员根据实际所需可以另外设计具有不同形状、大小、相对位置的区域/层。

[0045] 本发明提供了一种基于参数泵的超谐同步带宽增强方法及系统,包括参数泵模块和惯性传感模块;参数泵模块以固定的频率对惯性传感模块的耦合振荡系统施加参数泵动态刚度调制信号,实现耦合振荡器之间的声子和能量传递;参数泵介导的能量传递,实现振荡器之间耦合强度的提升,进而扩宽超谐同步振荡系统的同步区间;同步区间的拓宽,极大降低了产生超谐同步现象的难度,并提升了基于超谐同步原理的加速度计的动态检测范围;通过增大参数泵调制信号的强度,可以使耦合强度和同步区间的进一步扩大,实现动态检测范围的灵活调节。本发明通过参数泵介导的声子和能量传递,实现了超谐同步带宽的灵活调节,大幅提升了超谐同步加速度计等惯性传感器的动态检测范围,同时大量的能量传递也实现了频率稳定性的提升。基于此,该方法可以极大提升超谐同步惯性传感器的整体性能。

[0046] 请参阅图2,本发明一种基于参数泵的超谐同步带宽增强系统,包括参数泵模块和惯性传感模块;参数泵模块与惯性传感模块连接,惯性传感模块中的低频敏感梁模块和高频同步梁模块并列排布,并通过共用机械微梁3-1机械连接,频率变化信息通过各自独立的频率读取模块读取。

[0047] 请参阅图1,低频敏感梁模块包括低频敏感梁1-1、第一固支锚点1-2、第一金属电极层1-3、第一受激电极板1-4和第二连接锚点1-5。

[0048] 低频敏感梁1-1左右两端分别和与衬底绝缘层固结的第一固支锚点1-2和第二连接锚点1-5相连,使低频谐振梁1-1悬置于镂空的衬底上;低频谐振梁1-1中间向外侧伸出的第一受激电极板1-4悬置于镂空的衬底上,并与低频谐振器第一激励电极板4-1和第二激励电极板5-1分别组成电容极板,为低频谐振梁1-1提供激振力;低频谐振器第一激励电极板4-1和第二激励电极板5-1分别与第一激励锚点4-2和第二激励锚点5-2相连,从而悬置于镂空的衬底上。第一固支锚点1-2、第一激励锚点4-2、第二激励锚点5-2上分别溅射有第一金属电极层1-3、第四金属电极层4-3和第五金属电极层5-3,用于电信号的传输。

[0049] 高频同步梁模块包括高频同步梁2-1、第三固支锚点2-2、第二金属电极层2-3、第二受激电极板2-4、第四固支锚点2-5和第三金属电极层2-6。

[0050] 高频同步梁2-1左右两端分别和与衬底绝缘层固结的第三固支锚点2-2和第四固支锚点2-5相连,使高频谐振梁2-1悬置于镂空的衬底上;高频谐振梁2-1中间向外侧伸出的

第二受激电极板2-4悬置于镂空的衬底上,并与第三激励电极板6-1和第四激励电极板7-1分别组成电容极板,为高频谐振梁2-1提供激振力;第三激励电极板6-1和第四激励电极板7-1分别与第三激励锚点6-2和第四激励锚点7-2相连,从而悬置于镂空的衬底上。第三固支锚点2-2、第四固支锚点2-5、第三激励锚点6-2、第四激励锚点7-2上分别溅射有第二金属电极层2-3、第三金属电极层2-6、第六金属电极层6-3和第七金属电极层7-3,用于电信号的传输。

[0051] 并列排布的高频谐振梁2-1和低频谐振梁1-1之间通过共用机械微梁3-1机械连接。

[0052] 惯性传感模块包括敏感质量块,敏感质量块与第二连接锚点1-5相连接;当外界存在惯性力时,敏感质量块产生相应的位移,将应力传递给低频敏感梁,使其产生谐振频率的偏移。

[0053] 请参阅图2,低频敏感梁1-1和低频同步梁2-1分别置于第一振荡回路和第二振荡回路中产生自激振荡。

[0054] 具体的,第一振荡回路包括第一鉴相器10-1、第一低通10-2和第一电压控制振荡器VC010-3;第二振荡回路包括第二鉴相器11-1、第二低通11-2和第二电压控制振荡器VC011-3。

[0055] 鉴相器通过其内置乘法器判断来自检测极板的振荡信号与反馈信号之间的相位差,实现对电压控制振荡器VCO的控制,VCO产生的交流信号在输出振荡频率信息的同时,提供激励交流电压使得谐振梁产生自激振荡。低频振荡器的输出振荡频率信息分别通过第一频谱分析仪10-4和第一频率计数器10-5,高频振荡器的输出振荡频率信息通过第二频谱分析仪11-4和第二频率计数器11-5读取。

[0056] 参数泵模块包括参数泵信号发生器12-1和加法器12-2;参数泵信号发生器12-1在低频谐振梁1-1和低频同步梁2-1分别产生闭环振荡后,以固定的频率输出参数泵动态刚度调制信号,参数泵信号通过加法器12-1,与闭环回路1的闭环激励信号共同施加至第四金属电极层4-3,对耦合振荡系统中的振荡器分别进行刚度调制。

[0057] 参数泵信号的频率为:

$$[0058] \quad \omega_p = \Delta \omega = \omega_3 - \omega_1$$

[0059] 其中, ω_3 为高频梁的谐振频率, ω_1 为低频梁的谐振频率。

[0060] 参数泵信号的强度 V_p 调节范围为0~5V,通过激励电极板组成的电容对振荡器系统施加振幅为 A_p 的线性刚度调制,此时,低频谐振梁的线性刚度 $k_1 = k + A_p \cos(\omega_p t)$,振幅 A_p 为:

$$[0061] \quad A_p = \frac{2\varepsilon S V_{dc1} V_p}{g^3}$$

[0062] 其中, ε 为介电常数,S为电容极板的有效面积, V_{dc1} 为施加于第四金属电极层的直流电压大小,g为电容极板的间隙大小,k为低频梁固有的线性刚度。

[0063] 低频敏感梁1-1和低频同步梁2-1均为双端固支的单梁,低频敏感梁1-1和低频同步梁2-1的长度范围是10~500 μm ,单根梁的宽度范围是1~10 μm 。低频敏感梁和低频同步梁之间的共用机械微梁3-1是单梁,长度范围是5~10 μm ,宽度范围是1~5 μm 。第一固支锚点1-2、第三固支锚点2-2、第四固支锚点2-5、低频敏感梁的第一激励锚点4-2和第二激励锚点5-

2、第三激励锚点6-2和第四激励锚点7-2主体形状均为正方形,边长范围是100~300 μm 。第一金属电极层1-3、第二金属电极层2-3、第三金属电极层2-6、第四金属电极层4-3、第五金属电极层5-3、第六金属电极层6-3、第七金属电极层7-3的形状均为正方形,其边长尺寸范围是80~250 μm 。第一受激电极板1-4与第一激励电极板4-1和第二激励电极板5-1之间,第二受激电极板2-4与第三激励电极板6-1和第四激励电极板7-1之间间隙的距离范围是1~10 μm 。

[0064] 本发明一种基于参数泵的超谐同步带宽增强方法,当惯性传感模块受到外界加速度变化时,敏感质量的位移引起应力的变化,从而使得低频敏感梁1-1产生谐振频率的偏移;低频敏感梁1-1的频率信息通过共用机械微梁3-1,以扰动力的形式传输至高频同步梁2-1中;当高频振荡器和低频振荡器的频率满足一定关系时,高频振荡器和低频振荡器发生超谐同步效应;超谐同步的发生会增大低频敏感梁的频率偏移量,从而实现惯性力灵敏度的显著提高。

[0065] 为了保证高频振荡器和低频振荡器之间产生超谐同步现象, ω_1 和 ω_3 必须满足以下关系:

$$[0066] \quad N = \frac{\omega_3}{\omega_1}$$

[0067] 其中, ω_1 为低频敏感梁的线性谐振频率, ω_3 为高频同步梁的线性谐振频率,N为整数。超谐同步状态下,高频同步梁会将低频敏感梁的频率偏移量放大N倍,实现标度因子成倍的增大。

[0068] 本发明针对超谐同步惯性传感器同步带宽较小、同步效应难以实现、检测范围不能调节的问题,提出了基于参数泵的超谐同步带宽增强方法及系统,当高低频振荡器分别通过鉴相器、低通、电压控制振荡器VCO组成的振荡回路产生自激振荡后,通过参数泵模块以固定的频率对系统施加动态刚度调制信号。

[0069] 参数泵通过介导高低频振荡器之间的声子和能量传递,实现高低频振荡器之间耦合强度的提高,从而极大地提升振荡器之间的同步带宽,增大了传感器的检测范围,并使得同步效应更加易于产生。

[0070] 同时,通过增大参数泵的程度,可以使得耦合强度和超谐同步带宽进一步扩大,实现检测范围的灵活调节。

[0071] 其次,大幅的能量传递,使得振荡器的频率稳定性得到了提升,这将进一步改善加速度计的性能。最终该基于参数泵的超谐同步带宽增强方法及系统,从增大超谐同步带宽、方便工程实际应用、灵活调节检测范围、提高频率稳定性四个方面,大幅提升了超谐同步惯性力传感器的性能。

[0072] 参数泵对振荡器之间同步带宽大小的提升作用,可以通过多尺度法进行理论解释。具体的,耦合强度A表达式如下:

$$[0073] \quad A = \frac{c\varepsilon S V_{d2} V_p}{g^3 \sqrt{16\omega_1^4 + 24\omega_1^3 \delta\omega + 9\omega_1^2 \delta\omega^2 + c^2}} = \Gamma V_p$$

$$[0074] \quad \Gamma = \frac{c\varepsilon S V_{d2}}{g^3 \sqrt{16\omega_1^4 + 24\omega_1^3 \delta\omega + 9\omega_1^2 \delta\omega^2 + c^2}}$$

[0075] 其中, c 为共用机械微梁的线性刚度, ϵ 为介电常数, S 为电容极板的有效面积, V_{d2} 为 1 梁的直流激励电压, V_p 是参数泵信号的电压, g 为激励电容极板间的间隙, ω_1 为低频敏感梁的线性谐振频率, 6ω 为 ω_3 与 $3\omega_1$ 之差, ω_3 为高频同步梁的线性谐振频率; Γ 表达式中的参数在本发明中均为定值, 其中 V_{d2} 设置为恒定, 其余参数均为仅与结构参数有关常量。

[0076] 耦合强度 $A = \Gamma V_p \propto V_p$, 耦合强度正比于参数泵强度。

[0077] 发生同步时, 同步带宽定义为 $[-\delta\Omega_s, \delta\Omega_s]$; 其中, $\delta\Omega_s \propto \beta A$, 同步带宽大小正比与耦合强度 A (β 为与结构参数有关的常量)。

[0078] $\delta\Omega_s \propto \beta A = \beta \Gamma V_p$, 同步带宽大小正比于参数泵强度 V_p (β 和 Γ 均为常量)。通过增大参数泵的强度, 可以扩大超谐同步区间的大小, 从而实现加速度等惯性力检测范围的显著提升。

[0079] 综上所述, 本发明一种基于参数泵的超谐同步带宽增强方法及系统, 通过对耦合振荡器系统施加参数泵动态刚度调制信号, 介导能量的传递来增强振荡器之间耦合强度, 以此扩宽超谐同步带宽并实现传感器检测范围的扩大。并且, 同步带宽的扩大解决了谐振器之间频率不匹配和同步现象中频率锁定带宽较小的原因所带来的超谐同步现象难以实现的问题, 使得超谐同步现象更加易于在工程实际中的应用。同时, 通过控制参数泵信号的强度大小, 可以进一步调节超谐同步振荡器之间的耦合强度, 从而实现超谐同步传感器检测范围的灵活调节。最后, 由于能量交换的增强, 振荡器的频率稳定性也得到相应的提升, 有利于提高谐振式加速度计的分辨率和精度等性能。本发明从增大超谐同步带宽、方便工程实际应用、灵活调节检测范围、提高频率稳定性四个方面, 使得基于此方法的超谐同步惯性传感器的检测范围、标度因子、易于实现性、灵活性、测量精度、分辨率都得到显著提升。

[0080] 以上内容仅为说明本发明的技术思想, 不能以此限定本发明的保护范围, 凡是按照本发明提出的技术思想, 在技术方案基础上所做的任何改动, 均落入本发明权利要求书的保护范围之内。

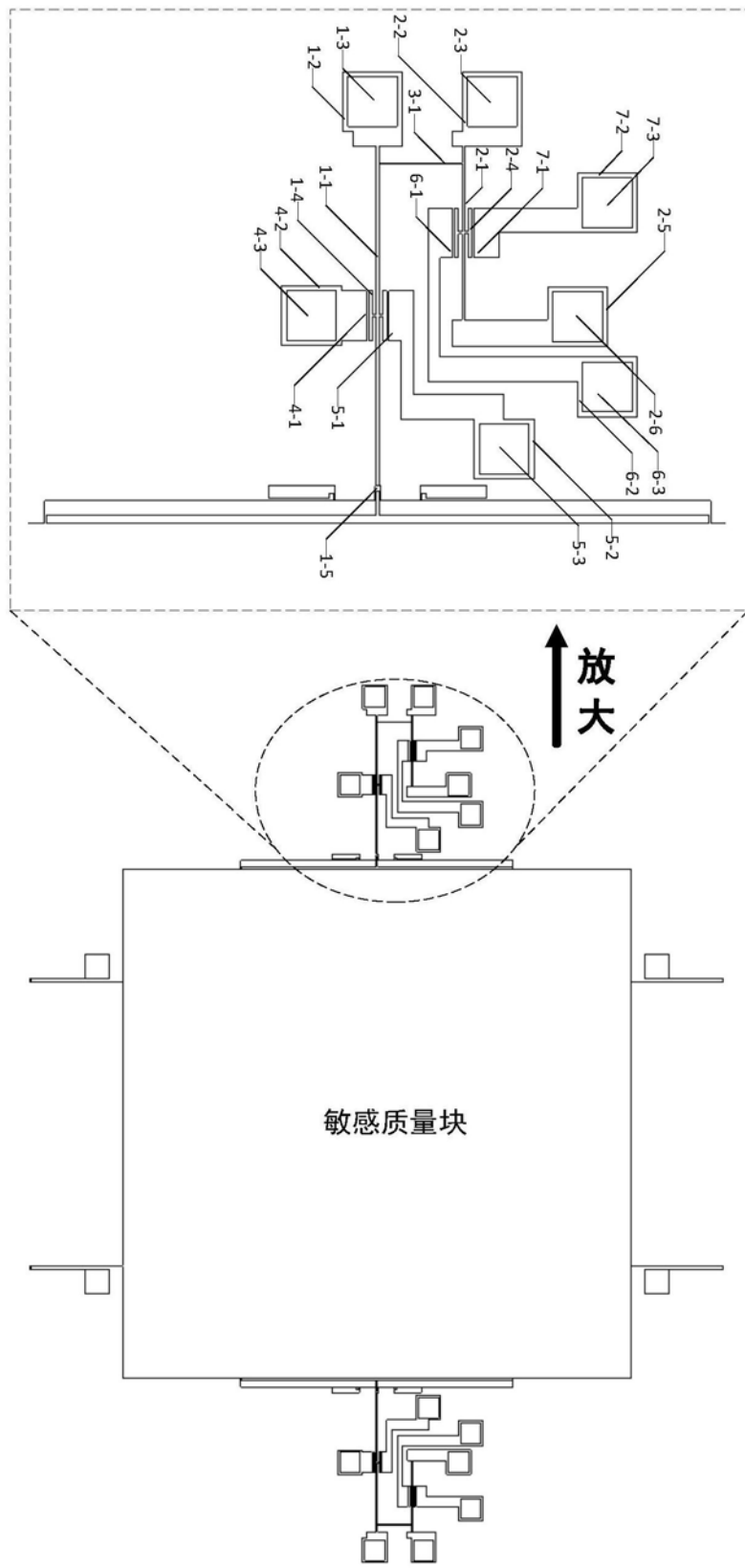


图1

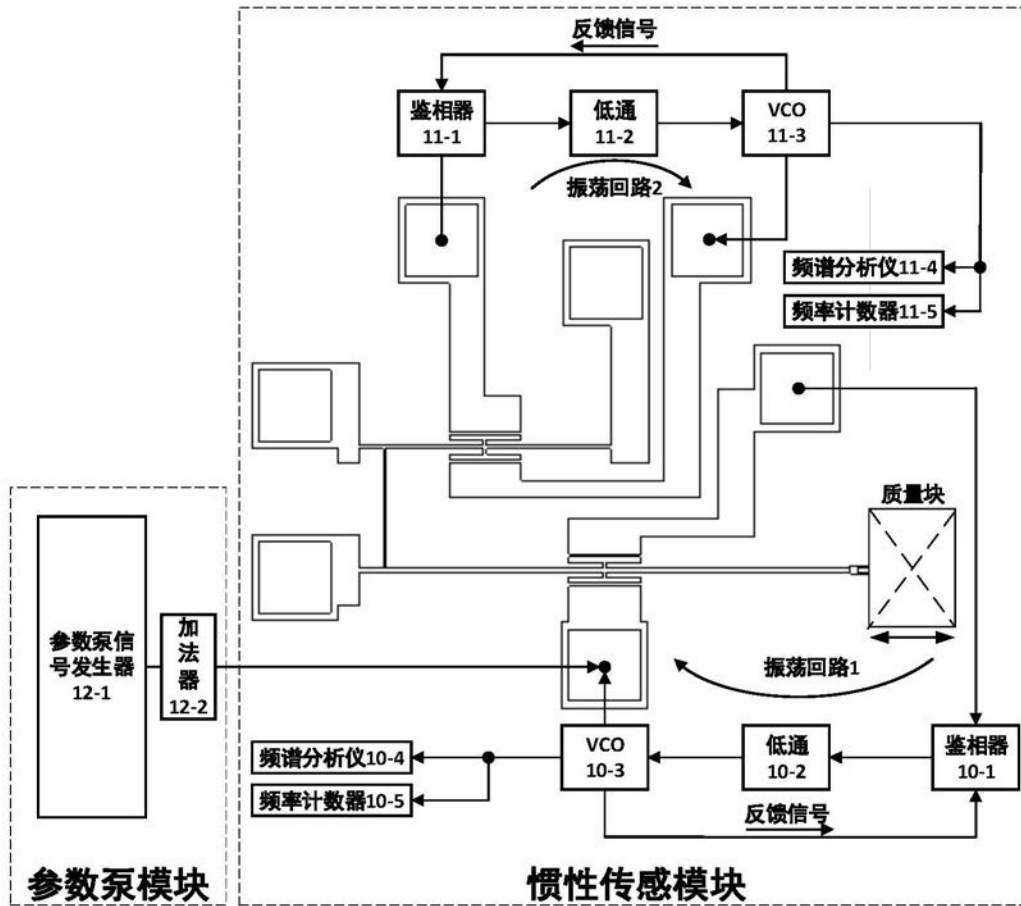


图2