

# (12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局

(43) 国际公布日  
2020年12月17日 (17.12.2020)



(10) 国际公布号  
**WO 2020/248516 A1**

(51) 国际专利分类号:  
*G01B 17/06* (2006.01) *G01S 15/93* (2020.01)  
*G01S 15/08* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/119709

(22) 国际申请日: 2019年11月20日 (20.11.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:  
201910494935.2 2019年6月10日 (10.06.2019) CN

(71) 申请人: 苏州博昇科技有限公司 (SUZHOU PHASERISE TECHNOLOGY CO., LTD.) [CN/CN]; 中国江苏省苏州市吴中区角直镇长虹北路169号B幢906室, Jiangsu 215127 (CN)。

(72) 发明人: 沈宇平 (SHEN, Yuping); 中国江苏省苏州市吴中区角直镇长虹北路169号B幢906室, Jiangsu 215127 (CN)。 谢明明 (XIE, Mingming); 中国江苏省苏州市吴中区角直镇长虹北路169号B幢906室, Jiangsu 215127 (CN)。 朱绪祥 (ZHU, Xuxiang); 中国江苏省苏州市吴中区角直镇长虹北路169号B幢906室, Jiangsu 215127

(CN)。 周新宗 (ZHOU, Xinzong); 中国江苏省苏州市吴中区角直镇长虹北路169号B幢906室, Jiangsu 215127 (CN)。 赵军辉 (ZHAO, Junhui); 中国江苏省苏州市吴中区角直镇长虹北路169号B幢906室, Jiangsu 215127 (CN)。

(74) 代理人: 苏州创元专利商标事务所有限公司 (SUZHOU CREATOR PATENT & TRADEMARK AGENCY LTD.); 中国江苏省苏州市姑苏区干将西路93号5楼, Jiangsu 215000 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) Title: AIR-COUPLED ULTRASONIC INTERFEROMETRY METHOD

(54) 发明名称: 空气耦合超声干涉法

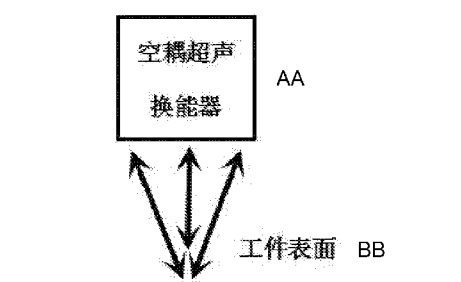


图 1

AA Air-coupled ultrasonic transducer  
BB The surface of the workpiece

(57) Abstract: An air-coupled ultrasonic interferometry method, comprising: taking an air-coupled ultrasonic transducer as a measuring head to face the surface of a workpiece, reflecting ultrasonic waves back and forth on the surface of the workpiece, and measuring a phase difference that first-time reflection echoes on the surface of the workpiece reach the air-coupled ultrasonic transducer; and on the basis of the change of the frequency and wavelength of ultrasonic waves, converting the measurement of the distance into the change rate of the phase of acoustic waves with respect to the angular frequency of the acoustic waves. The change of the angular frequency of the acoustic waves is equal to the difference between the highest frequency  $F_2$  and the lowest frequency  $F_1$  in a bandwidth  $f_B$  of the air-coupled ultrasonic transducer multiplied by  $2\pi$ ; the change of the phase of the acoustic waves is equal to the difference between integral multiples obtained by dividing the sound path by the wavelength at the frequency  $F_2$  and the frequency  $F_1$  multiplied by  $2\pi$ . The ultrasonic technology is based on long-term continuous emission and large-span frequency scanning, and has the advantages of high measurement accuracy and strong anti-interference ability; the corresponding technology of the ultrasonic technology in laser interference is relatively difficult to achieve.



NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

**本国际公布:**

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

---

**(57) 摘要:** 一种空气耦合超声干涉法, 包括将空气耦合超声换能器作为测头正对工件表面, 超声波在工件表面发生来回反射, 测得第一次工件表面反射回波达到空气耦合超声换能器的相位差; 基于超声波频率及波长的变化, 则将距离的测量转变成声波相位相对于声波角频率的变化率; 声波角频率的变化为空气耦合超声换能器带宽 $f_B$ 内最高频率 $F_2$ 与最低频率 $F_1$ 之差乘以 $2\pi$ ; 声波相位的变化为 $F_2$ 频率下与 $F_1$ 频率下声程除以波长所得整倍数的差值乘以 $2\pi$ 。该超声技术基于长时间的持续发射和大跨度的频率扫描, 具有测量精度高和抗干扰能力强的优点, 其在激光干涉中的对应技术比较难以实现。

## 空气耦合超声干涉法

### 技术领域

本发明涉及空气耦合超声测距技术领域，特别是空气耦合超声干涉法。

### 背景技术

复杂结构高精度纳米加工以后，需要对表面的自由曲面进行高精度测量。但是静态的自由曲面的高精度测量方法和技术一直是一个难题。超精密加工后表面轮廓精度超精密测量难、测量成本高、表面表征理论和测量方法未有应用性突破。

目前对复杂结构纳米加工表面的自由曲面测量的方法中高精度的测量方法行业内普遍采用三轴坐标机技术平台。这个技术平台包括高精度的标尺系统如线纹尺、精密丝杆、感应同步器、光栅尺、磁尺及光波波长等；包括导轨系统如滑动导轨、滚动轴承导轨和气浮导轨等；包括驱动、平衡、转台等技术模块系统，另外再加上技术上与三轴坐标机其它部分相对独立的三维测头。总体来说，对于三坐标机系统，位置和尺寸测量精度达到微米量级的已经是高端产品，关键要看测头测量精确度的技术水平。测头分为接触式与非接触式。接触式的探针类测头是目前主要使用的测头类型，探针类的测量精度一般不会优于微米量级。

非接触式测头的种类主要分为光学、超声和电磁几类。其中光学类测头是目前国内外研究的热点。光学类测头里面又分为线结构光法、激光三角法、激光半焦斑成像法等。目前公开文献见到的国内最好的实验室指标是采用的半光斑成像式激光测头实现的，其重复瞄准不确定度最好的效果达到微米量级，测量灵敏度可达  $30\text{mV}/\mu\text{m}$ ，激光跟踪瞄准被测曲面倾角可达  $25^\circ$ 。但是该方法受材料类别影响非常大，材料的颜色以及材料表面的吸光性质都会影响测量的灵敏度，所以对不同的材料需要不同的标准试样。有时候材料的标准试样是很难获取的。

激光干涉式测头主要最对微小的相对变化量敏感，对绝对量不敏感，绝对测量精度受制于控制台的三维坐标瞄准。而且激光干涉测头对被测工件表面的激光反射特性要求很高，反射率太高太低都不好，有些特殊的吸波材料还需要要更换不同波长的激光。所以激光干涉法目前没有受到大规模推广应用。

空气超声法测距主要用时差法。一般来说，频率越高，测距精度越高。但是  $1\text{MHz}$  量级的高频超声波在空气中的衰减很大，以至于无法用于常见距离的测量。另外空气

超声时差法受外界干扰较大，所以实际应用中时差法的测距精度大打折扣。举例来说汽车行业广泛应用的空气耦合超声测距倒车雷达采用的频率一般在几十 KHz 量级，其测距精度通常在一个发射波长的量级。比如一个 40KHz 的超声波倒车雷达的测距精度大约在 10mm 左右。

### 发明内容

本发明的技术方案是：空气耦合超声干涉法，如果空气耦合超声测头正对着工件表面，超声波换能器发射出的超声波在工件表面就会发生来回发射。超声波在空气中传播的波长  $\lambda$  为

$$\lambda = c / f \quad (1)$$

式中  $c$  是空气声速， $f$  是超声波频率。

如果频率变化，空气超声波测头声程不变，但是相位会改变。第一次工件表面反射回波到达空耦超声换能器的相位差  $\Phi$  为：

$$\Phi = 2\pi L / \lambda \quad (2)$$

式中  $L$  是超声波从换能器到工件表面再反射回换能器的声程，空气耦合超声换能器到工件的距离则为  $L/2$ 。(1) 式代入 (2) 式中有

$$\Phi = 2\pi f L / c \quad (3)$$

如果超声波频率发生微小变化，相位差也发生微小变化。(3) 式对微小频率变化  $\Delta f$  展开得到微小相位差变化  $\Delta\Phi$ ：

$$\Delta\Phi = 2\pi L \Delta f / c = L \Delta\omega / c \quad (4)$$

其中  $\Delta\omega$  为微小角频率变化。继续整理后有

$$L = c \cdot \Delta\Phi / \Delta\omega \quad (5)$$

从公式 (5) 可知，我们把距离的测量转变成了相位相对角频率  $\omega$  的变化率，这个变化率是一个与被测量距离线性相关的常数。令式 (5) 中的  $\Delta\Phi$  为一个周期  $2\pi$ ，则式 (5) 变为

$$L = c \cdot / \Delta f = c \cdot / (f_2 - f_1) \quad (6)$$

式中  $f_1$  和  $f_2$  是相邻的两个相位周期对应的频率。

优选的是，公式 (6) 还可以以另一种方法推出。假设在某一频率  $f_1$  下总声程为波长  $\lambda_1$  的整数  $n$  倍，则

$$L = n\lambda_1 = nc / f_1 \quad (7)$$

如果连续增加频率，可以得到一个频率  $f_2$ ，此频率下总声程为波长  $\lambda_2$  的整数  $(n+1)$  倍

$$L = (n+1)\lambda_2 = (n+1)c/f_2 \quad (8)$$

联合 (7) 和 (8) 式消去  $n$  求解  $L$  也可以得到公式 (6)。

定义空气耦合超声换能器带宽  $f_B$  内最低的一个频率  $F_1$ , 该频率下声程  $L$  为波长的整数倍  $N_1$ ; 定义空气耦合超声换能器带宽  $f_B$  内最高的一个频率  $F_2$ , 该频率下声程  $L$  也为波长的整数倍  $N_2$ 。我们后面将会说明  $N_1$  和  $N_2$  可以用声时差法或者干涉法准确地求出。我们后面也将说明, 通常换能器带宽与这两个频率的差值相差极小, 即

$$F_2 - F_1 \approx f_B \quad (9)$$

为了表述方便, 我们以后会用频带宽度  $f_B$  来代替公式 (9) 中的频率差来说明该频率差的物理意义。把频率差和相位差代入到公式 (5) 中有,

$$L = c \cdot (N_2 - N_1) / (F_2 - F_1) \quad (10)$$

因为  $c$ ,  $N_2$ ,  $N_1$  都为非常容易确定的常数, 由误差分析可知式 (10) 的总声程相对误差为

$$\delta L/L = \delta(F_2 - F_1) / |F_2 - F_1| = (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / |F_2 - F_1| \quad (11)$$

或者空气耦合超声换能器测头到工件的距离相对测量误差为:

$$(\delta L/2) / (L/2) = (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / |F_2 - F_1| \quad (12)$$

总声程  $L$  的测量绝对误差为

$$\delta L = L \cdot (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / |F_2 - F_1| \quad (13)$$

或者空气耦合超声换能器测头到工件的距离测量绝对误差为

$$\delta L/2 = L/2 \cdot (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / |F_2 - F_1| \approx L/2 \cdot (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / f_B \quad (14)$$

公式 (12) 和 (14) 为我们提供了估算测量相对精度和绝对精度的计算公式。公式 (14) 说明, 要想提高测量的绝对精度, 需要增大带宽  $f_B$  (或者  $F_2 - F_1$ ), 减小被测距离  $L/2$ , 减小  $F_1$  和  $F_2$  的测量不确定度。对于空气耦合超声换能器, 由于单探头在被测工件表面的反射率几乎为 100%, 信号非常强, 所以在空气超声测距应用中可以适当放宽应用带宽的范围, 比如可以选用 -20dB 带宽。通常商业应用级别的压电型空气耦合超声换能器在空气中的插入损耗 -6dB 带宽在 20%~50% 左右, -20dB 带宽能够达到 100%。因此, 公式 (14) 中的带宽  $f_B$  可以近似用换能器的中心频率  $f_w$  代替。不失一般性, 公式 (14) 可以整理为:

$$\delta L/2 \approx L/2 \cdot (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / f_w \quad (15)$$

举例说明, 如果我们选用一个非常常见的 300KHz 的空气耦合超声压电换能器, 换能器到工件的距离选为 45mm, 频率步进选为 10Hz 或者说频率测量误差为 10Hz, 根据公式 (15) 可知距离测量误差为

$$\delta L/2 \approx 45\text{mm} \cdot (10+10) / (300\text{k}) = 3 \times 10^{-3} \text{mm} = 3\mu\text{m} \quad (16)$$

这个测量精度已经远远高于脉冲反射方法。

我们再回头论证一下公式 (9) 的合理性。由以上所选取的实验参数可知相邻两个周

期的频率差为

$$(f_2 - f_1) = c/L = 340/(90 \times 10^{-3}) = 3800\text{Hz} = 3.8\text{KHz} \quad (17)$$

公式(9)中  $f_B$  与  $(F_2 - F_1)$  的最大差值百分比为:

$$2 \times 3.8\text{KHz} / 300\text{KHz} = 2.5\% \quad (18)$$

所以公式(9)是有根据近似成立的,在说明物理意义时我们可以用带宽  $f_B$  来代替  $F_2 - F_1$  的频率差。这进一步说明带宽越宽,干涉测量方法越精确。

我们采用一种特殊的超声波激励方式来实现上述干涉法测量。我们用正负变化的正弦波或者方波一个固定频率持续激发空气耦合超声换能器,激发的时间大于一次回波的时间,小于第二次回波的时间。第一次回波时间和第二次回波时间可以通过一个短周期的脉冲反射方法快速获得。然后我们变换激发频率按照上面的激励方法进行频率扫描检测。以扫描角频率为横坐标,以发生干涉的时域信号的绝对值积分为纵坐标作二维图。则该二维图为一个类似正弦波变化的曲线,可以用一个正弦波函数使用回归算法来拟合该曲线。频带越宽,模拟的结果就越准确。模拟出来的正弦波函数周期可以认为是权利要求2中在  $\Delta\Phi$  为  $2\pi$  时的  $\Delta\omega$ 。发生干涉的时域信号选取范围为从第二次回波时间始至超声波持续激发时间加上第一次回波时间为至的时间区间以内。

本发明的优点是:

第一、该超声技术基于超过一个回波时间的长时间的持续发射和相对带宽内大跨度的频率扫描,具有测量精度高和抗干扰能力强的优点,其在激光干涉中的对应技术比较难以实现。

第二、该技术理论相对测距精确度正比于频率的测量误差值与空气耦合超声换能器的带宽比值,其短距离测距精度可以达到亚微米量级,长距离测距精度可以优于1%的波长。

第三、该测距技术短距离可以应用于自由曲面轮廓的高精度扫描,长距离可以应用于汽车自动驾驶时超声波雷达抗干扰测距。

## 附图说明

下面结合附图及实施例对本发明作进一步描述:

图1是空气耦合超声测头测距示意图;

图2是空气耦合超声测头实物图;

图3是399.8KHz、50Vpp、120周期连续激发产生相干相长的频率图;

图4是402KHz、50Vpp、120周期连续激发产生相干相消的频率图;

图5是399.8KHz、50Vpp、3周期连续激发用于时差法测量的频率图;

图6是550KHz换能器置于工件上方25mm时的干涉部分幅值绝对值积分平均值与频率的变化。

## 具体实施方式

实施例：

选取一个空气耦合超声换能器垂直对准被测工件自由曲面，如图 1 所示。选用聚焦式换能器可以缩小焦斑，提高横向分辨率；选用直径小的频率高的空气耦合超声平面换能器也能达到类似效果。空气耦合超声换能器的外径一般在 10mm 到 50mm 之间，如图二的实物照片所示，加上适当的夹具后可以直接作为测头安装在三轴坐标测量机上。聚焦换能器焦斑一般在 1mm 到 5mm 之间，焦距在 5mm 到 50mm 之间；平面换能器晶片直径一般在 10mm~50mm，近场区一般在 10mm~100mm 之间。空耦超声换能器在高频段（1MHz 以上）一般都选用平面型。

选用空气耦合超声自动扫描系统作为测试平台，分别选择一个中心频率为 400KHz 的压电空气耦合超声换能器垂直固定在离工件表面大约 42mm 的上方，以及一个中心频率为 550KHz 的压电空气耦合超声换能器垂直固定在离工件表面大约 25mm 的上方。

一个 400KHz 换能器自发自收的声压电信号随时间变化的曲线，如图 3 至 5 所示。其中最图 5 中 3 个周期激发的数据可以用作比较粗略的时差法测距，多次重复测量精度优于 1mm。图 3 和图 4 是连续波激发，连续激发的时间超过了第一次回波的时间，小于第二次回波时间，于是超过第一次回波时间的连续激发部分与第一次回波发生干涉效应。有的频率相干相长，有的频率相干相消，并且在第二次回波时反应出来（如图中方框所标示处）。将干涉部分幅值取绝对值积分平均，就会得到随频率类似正弦波变化的曲线。作为实例，图 6 为一个更高频率 550KHz 换能器放置于工件上方约 25mm 时得到的干涉部分幅值绝对值积分平均值与频率的变化。实际应用中，该曲线可以进行一次带通滤波变成比较光滑和易于数据处理的正弦波曲线。

从图 6 可以用肉眼估算大约从 530KHz 到 570kHz 干涉相位变化了 6 个周期，将该数据代入到公式（10）有：

$$L = c \cdot (N_2 - N_1) / (F_2 - F_1) = 340m/s \times \frac{6}{(570 - 530)KHz} = 51mm \quad (19)$$

也就是说换能器与工件上被测点的距离为 51mm/2=25.5mm，这与实验设置时放置的大致位置 25mm 比较接近。精确度达到微米量级的计算可以从图四中提取更加精确的频率数据得到。比如对图 6 进行滤波后用一个正弦波函数进行回归拟合，得到的精确

的拟合的正弦函数周期。该周期乘以  $2\pi$  即为公式 (5) 中  $\Delta\Phi$  为  $2\pi$  时的  $\Delta\omega$ ，从而声程  $L$  可以通过公式 (5) 计算出。

当换能器降低频率到 40KHz 与 100KHz 之间工作在与工件距离 1 米到 20 米的范围时，作者在实际应用实验中能够快速得到的绝对误差通常优于一个波长的 1%量级。

在频率扫描时，为了提高测距速度，除了带宽两端以外，带宽以内的频率可以按照奈奎斯特最低采样定律快速采样扫频以确定方程式 (10) 中的  $N_1$  和  $N_2$ 。按照前述的持续发射得到相干信号之前，可以先按照图三中的下图以低周期脉冲发射得到粗略的距离  $L_c$ ，根据下式可得带宽内连续最大频率扫描步进  $F_s$  为

$$F_s > 2 \times \frac{c}{L_c} \quad (20)$$

为了更进一步提高测距速度，该带宽中间的频率步进扫描也可以省略。图四中的周期可以大致估算为  $c/L_c$ ，这样可以得到式 (11) 中  $N_1$  和  $N_2$  的初值。这样在带宽的两端各精细地扫描一个频率周期足以精确地确定式 (10) 中的  $F_1$  和  $F_2$ 。

本发明所提出的空气耦合超声高精度测距干涉技术中，测量的相对精度等于电子设备对频率测量的误差与空气耦合超声具体应用频带的比值。实际工程应用中，对频率的测量精度非常高，加上空气耦合超声换能器在空气中的应用相对频带非常高，所以该技术可以给出极高的距离测量精度。其短距离测距精度可以达到亚微米量级，长距离测距精度可以优于 1% 的波长。其中，短距离可以应用于自由曲面轮廓的高精度扫描，长距离可以应用于汽车自动驾驶时超声波雷达抗干扰测距等。

上述实施例仅例示性说明本发明的原理及其功效，而非用于限制本发明的。任何熟悉此技术的人士皆可在不违背本发明的精神及范畴下，对上述实施例进行修饰或改变。因此，举凡所属技术领域中具有通常知识者在未脱离本发明的所揭示的精神与技术思想下所完成的一切等效修饰或改变，仍应由本发明的权利要求所涵盖。

## 权利要求书

1. 空气耦合超声干涉法，将空气耦合超声换能器作为测头正对工件表面，其特征在于：超声波在工件表面发生来回反射，测得第一次工件表面反射回波达到空气耦合超声换能器的相位差；基于超声波频率及波长的变化，则将距离的测量转变成声波相位相对于声波角频率的变化率；所述声波角频率的变化为空气耦合超声换能器带宽  $f_B$  乘以  $2\pi$ ；所述声波相位的变化为带宽上边界频率时与带宽下边界频率时声程除以波长所得数值的差值乘以  $2\pi$ 。
2. 根据权利要求 1 所述的空气耦合超声干涉法，其特征在于：声波相位相对于声波角频率的变化率，即声波相位差相对于声波角频率差的比值，其与声程的公式关系为：

$$L = \lambda \cdot (\Delta\Phi / 2\pi) / (\Delta f / f) = c \cdot \Delta\Phi / \Delta\omega,$$

其中  $\Delta\Phi$  为声波相位差， $\Delta\omega$  为声波角频率差。

3. 根据权利要求 2 所述的空气耦合超声干涉法，其特征在于：声波相位相对于声波角频率的变化率是一个与被测距离线性相关的常数，其也可以转化为相邻的两个相位周期对应的频率之差，其与声程的公式关系为：

$$L = c \cdot / \Delta f = c \cdot / (f_2 - f_1).$$

4. 根据权利要求 2 所述的空气耦合超声干涉法，其特征在于：将声波角频率差和声波相位差用空气耦合超声换能器带宽  $f_B$  内声程为波长整数倍的最高频率  $F_2$  与声程为波长整数倍的最低频率  $F_1$  之间的关系来替换，则声程的公式转化为：

$$L = c \cdot (N_2 - N_1) / (F_2 - F_1).$$

5. 根据权利要求 4 所述的空气耦合超声干涉法，其特征在于：超声波在一个固定频率检测时持续激发的时间大于一次回波的时间，小于第二次回波的时间。
6. 根据权利要求 5 所述的空气耦合超声干涉法，其特征在于：超声波进行扫频检测，以扫查角频率为横坐标，以发生干涉的时域信号绝对值积分为纵坐标作二维图，对该二维图所呈现的正弦波变化曲线用正弦波函数回归算法来拟合；扫频跨度的大小与拟合数据的误差大小反相关；模拟出来的正弦波函数周期为相邻的两个相位周期对应的角频率之差  $2\pi(f_2 - f_1)$ ，且此时声波相位差  $\Delta\Phi$  为  $2\pi$ 。

7. 根据权利要求 6 所述的空气耦合超声干涉法，其特征在于：发生干涉的时域信号范围为：从第二次回波时间开始，至超声波持续激发时间加上第一次回波的时间为结束的时间区间。
8. 根据权利要求 7 所述的空气耦合超声干涉法，其特征在于：根据误差分析法，声程的相对

误差公式为： $\delta L/L = \delta(F_2 - F_1)/|F_2 - F_1| = (|\delta F_2| + |\delta F_1|)/|F_2 - F_1|$ 。

9. 根据权利要求 8 所述的空气耦合超声干涉法，其特征在于：声程的绝对误差公式为：

$$\delta L = L \cdot (|\delta F_2| + |\delta F_1|)/|F_2 - F_1|。$$

10. 根据权利要求 9 所述的空气耦合超声干涉法，其特征在于：第一次工件表面反射回波达到空气耦合超声换能器的相位差  $\Phi = 2\pi L/\lambda$ ；其中  $\lambda$  为波长；L 是超声波从换能器到工件表面再反射回换能器的声程，声程等于两倍的被测距离。

11. 根据权利要求 10 所述的空气耦合超声干涉法，其特征在于：超声波频率发生变化时，波长发生变化，相位也发生变化；相位变化的差值对频率变化的差值的关系为：

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi L}{c} \Delta f。$$

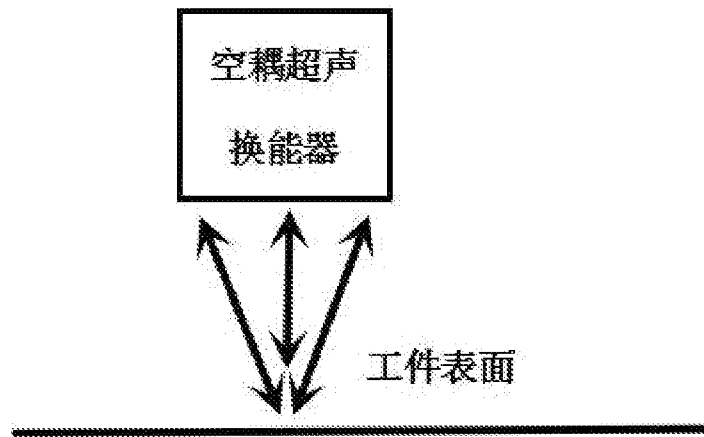


图 1

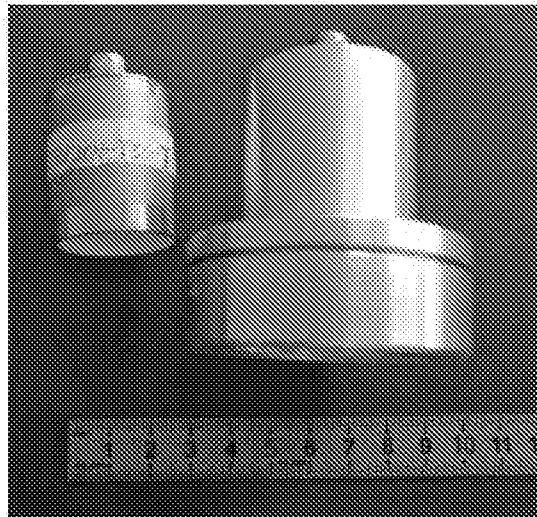


图 2

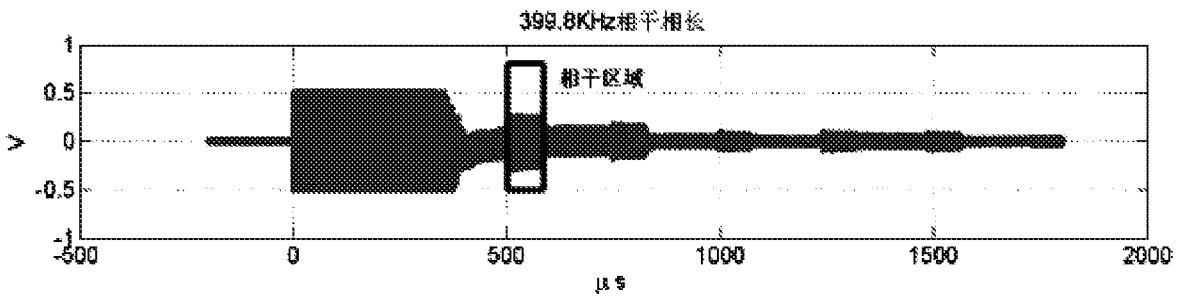


图 3

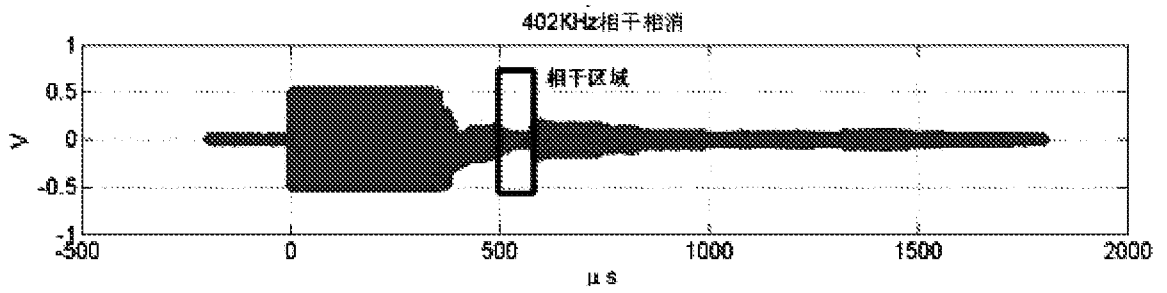


图 4

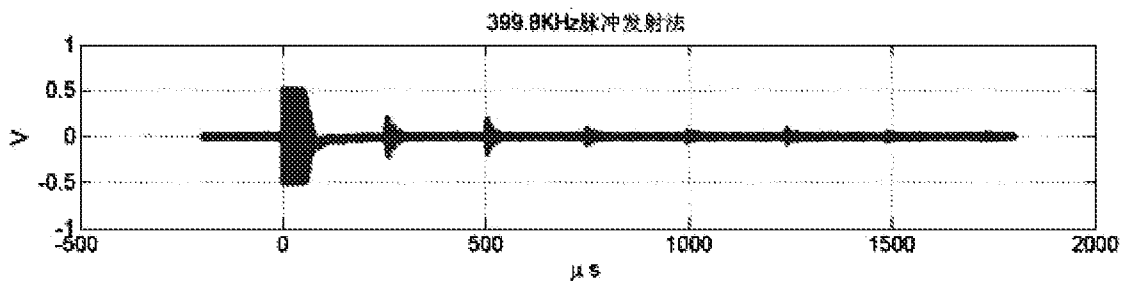


图 5

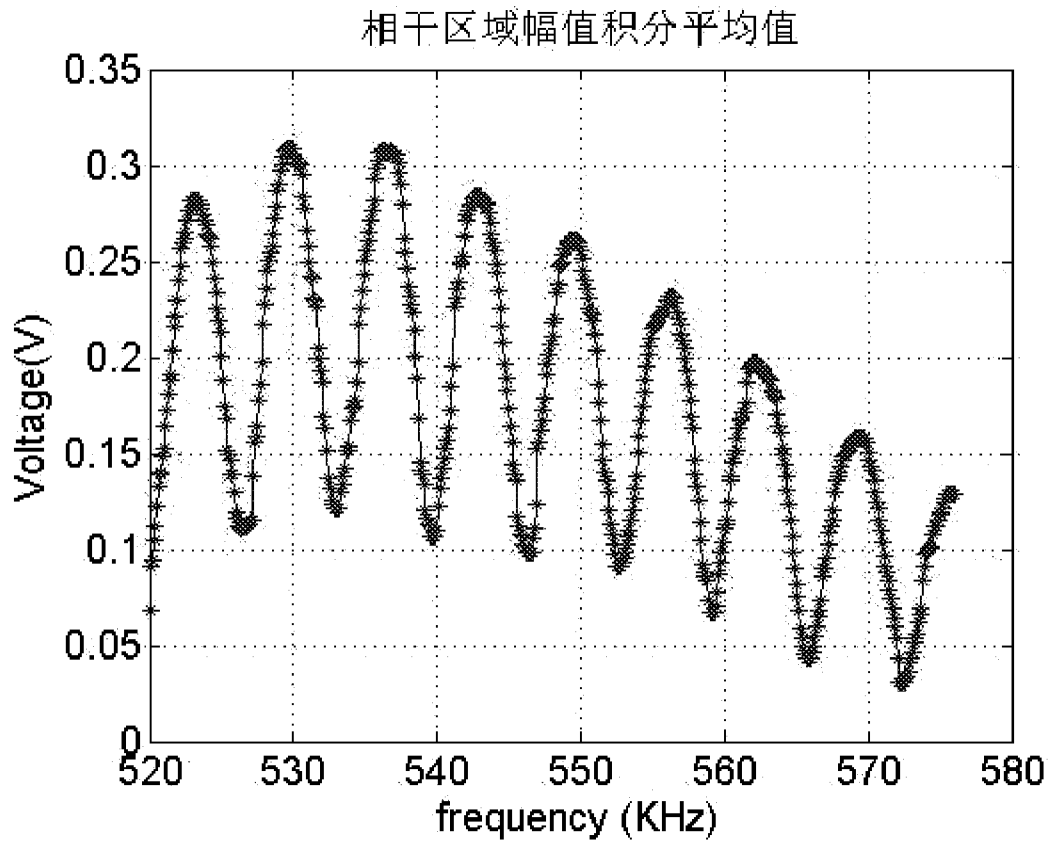


图 6

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/119709

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
G01B 17/06(2006.01)i; G01S 15/08(2006.01)i; G01S 15/93(2020.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01B,G01S		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) CNKI, VEN, CNTXT, CNABS: G01B, G01S, 空气, 耦合, 超声, 干涉, 换能器, 测头, 探头, 表面, 反射, 相位差, 频率, 波长, 变化, 距离, 角频率, 变化率, 带宽, air, coupl+, ultrasonic, interfere+, head, surface, reflect+, phase+, frequenc+, rate, change, wave?length+, distance, difference, angular, bandwidth		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 110231006 A (SUZHOU PHASERISE TECHNOLOGY CO., LTD.) 13 September 2019 (2019-09-13) claims 1-11, description, paragraphs 0007-0071, and figures 1-6	1-11
Y	SU 1755047 A1 (KI T I LEGKOJ PROMY) 15 August 1992 (1992-08-15) description, page 2	1-2
Y	CN 103676240 A (HEFEI BOE OPTOELECTRONICS TECHNOLOGY CO., LTD. et al.) 26 March 2014 (2014-03-26) description, paragraph 9	1-2
A	CN 102865839 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 09 January 2013 (2013-01-09) entire document	1-11
A	CN 108445517 A (BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS) 24 August 2018 (2018-08-24) entire document	1-11
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search <b>29 February 2020</b>		Date of mailing of the international search report <b>06 March 2020</b>
Name and mailing address of the ISA/CN <b>China National Intellectual Property Administration No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088 China</b> Facsimile No. (86-10)62019451		Authorized officer  Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/119709

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 105004792 A (BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 28 October 2015 (2015-10-28) entire document	1-11
A	CN 109696680 A (BEIJING HTE-ROBOT INNOVATION TECHNOLOGY CO., LTD.) 30 April 2019 (2019-04-30) entire document	1-11
A	SU 1357708 A1 (KI T I LEGKOJ PROMY) 07 December 1987 (1987-12-07) entire document	1-11
A	JP 2012037294 A (JTEKT CORP.) 23 February 2012 (2012-02-23) entire document	1-11
A	JP 5871421 A (MITSUBISHI HEAVY IND. LTD.) 28 April 1983 (1983-04-28) entire document	1-11
A	JP 10300551 A (ISHII, Y.) 13 November 1998 (1998-11-13) entire document	1-11
A	刘镇清 (LIU, Zhenqing). "测量超声波速度的相位谱方法 (A Phase Spectrum Method for Determination of Ultrasonic Wave Velocity)" <i>声学技术 (Technical Acoustics)</i> , Vol. 12, No. (02), 05 May 1993 (1993-05-05), pages 19-22	1-11
A	陈伟民等 (CHEN, Weimin et al.). "基于微波雷达的位移/距离测量技术 (Non-official translation: Displacement/Distance Measurement Technology Based on Microwave Radar)" <i>电子测量与仪器学报 (Journal of Electronic Measurement and Instrumentation)</i> , Vol. 29, No. (09), 15 September 2015 (2015-09-15), pages 1251-1265	1-11

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/CN2019/119709**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)	
CN	110231006	A	13 September 2019	None		
SU	1755047	A1	15 August 1992	None		
CN	103676240	A	26 March 2014	CN	103676240 B	01 August 2017
CN	102865839	A	09 January 2013	CN	102865839 B	01 July 2015
CN	108445517	A	24 August 2018	CN	108445517 B	06 September 2019
CN	105004792	A	28 October 2015	None		
CN	109696680	A	30 April 2019	None		
SU	1357708	A1	07 December 1987	None		
JP	2012037294	A	23 February 2012	None		
JP	5871421	A	28 April 1983	JP	S5871421 A	28 April 1983
JP	10300551	A	13 November 1998	JP	H10300551 A	13 November 1998
				JP	3790873 B2	28 June 2006

<p><b>A. 主题的分类</b></p> <p>G01B 17/06(2006.01)i; G01S 15/08(2006.01)i; G01S 15/93(2020.01)i</p> <p>按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类</p>																										
<p><b>B. 检索领域</b></p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>G01B, G01S</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))</p> <p>CNKI, VEN, CNTXT, CNABS:G01B, G01S, 空气, 耦合, 超声, 干涉, 换能器, 测头, 探头, 表面, 反射, 相位差, 频率, 波长, 变化, 距离, 角频率, 变化率, 带宽, air, coupl+, ultrasonic, interfere+, head, surface, reflect+, phase+, frequenc+, rate, change, wave?length+, distance, difference, angular, bandwidth</p>																										
<p><b>C. 相关文件</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 110231006 A (苏州博昇科技有限公司) 2019年 9月 13日 (2019 - 09 - 13) 权利要求1-11, 说明书第0007-0071段; 图1-6</td> <td>1-11</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>SU 1755047 A1 (KI T I LEGKOJ PROMY) 1992年 8月 15日 (1992 - 08 - 15) 说明书第2页</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 103676240 A (合肥京东方光电科技有限公司等) 2014年 3月 26日 (2014 - 03 - 26) 说明书第9段</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102865839 A (华南理工大学) 2013年 1月 9日 (2013 - 01 - 09) 全文</td> <td>1-11</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 108445517 A (北京邮电大学) 2018年 8月 24日 (2018 - 08 - 24) 全文</td> <td>1-11</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105004792 A (北京工业大学) 2015年 10月 28日 (2015 - 10 - 28) 全文</td> <td>1-11</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 109696680 A (北京哈工科教机器人科技有限公司) 2019年 4月 30日 (2019 - 04 - 30) 全文</td> <td>1-11</td> </tr> </tbody> </table>			类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 110231006 A (苏州博昇科技有限公司) 2019年 9月 13日 (2019 - 09 - 13) 权利要求1-11, 说明书第0007-0071段; 图1-6	1-11	Y	SU 1755047 A1 (KI T I LEGKOJ PROMY) 1992年 8月 15日 (1992 - 08 - 15) 说明书第2页	1-2	Y	CN 103676240 A (合肥京东方光电科技有限公司等) 2014年 3月 26日 (2014 - 03 - 26) 说明书第9段	1-2	A	CN 102865839 A (华南理工大学) 2013年 1月 9日 (2013 - 01 - 09) 全文	1-11	A	CN 108445517 A (北京邮电大学) 2018年 8月 24日 (2018 - 08 - 24) 全文	1-11	A	CN 105004792 A (北京工业大学) 2015年 10月 28日 (2015 - 10 - 28) 全文	1-11	A	CN 109696680 A (北京哈工科教机器人科技有限公司) 2019年 4月 30日 (2019 - 04 - 30) 全文	1-11
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																								
PX	CN 110231006 A (苏州博昇科技有限公司) 2019年 9月 13日 (2019 - 09 - 13) 权利要求1-11, 说明书第0007-0071段; 图1-6	1-11																								
Y	SU 1755047 A1 (KI T I LEGKOJ PROMY) 1992年 8月 15日 (1992 - 08 - 15) 说明书第2页	1-2																								
Y	CN 103676240 A (合肥京东方光电科技有限公司等) 2014年 3月 26日 (2014 - 03 - 26) 说明书第9段	1-2																								
A	CN 102865839 A (华南理工大学) 2013年 1月 9日 (2013 - 01 - 09) 全文	1-11																								
A	CN 108445517 A (北京邮电大学) 2018年 8月 24日 (2018 - 08 - 24) 全文	1-11																								
A	CN 105004792 A (北京工业大学) 2015年 10月 28日 (2015 - 10 - 28) 全文	1-11																								
A	CN 109696680 A (北京哈工科教机器人科技有限公司) 2019年 4月 30日 (2019 - 04 - 30) 全文	1-11																								
<p><input checked="" type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。 <input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p>																										
<p>* 引用文件的具体类型:</p> <p>“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件</p> <p>“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利</p> <p>“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)</p> <p>“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件</p> <p>“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件</p> <p>“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件</p> <p>“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性</p> <p>“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性</p> <p>“&amp;” 同族专利的文件</p>																										
<p>国际检索实际完成的日期</p> <p>2020年 2月 29日</p>		<p>国际检索报告邮寄日期</p> <p>2020年 3月 6日</p>																								
<p>ISA/CN的名称和邮寄地址</p> <p>中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088</p> <p>传真号 (86-10)62019451</p>		<p>授权官员</p> <p>潘景良</p> <p>电话号码 8601062089969</p>																								

C. 相关文件		
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	SU 1357708 A1 (KI T I LEGKOJ PROMY) 1987年 12月 7日 (1987 - 12 - 07) 全文	1-11
A	JP 2012037294 A (JTEKT CORP) 2012年 2月 23日 (2012 - 02 - 23) 全文	1-11
A	JP 5871421 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD) 1983年 4月 28日 (1983 - 04 - 28) 全文	1-11
A	JP 10300551 A (ISHII YASUSHI) 1998年 11月 13日 (1998 - 11 - 13) 全文	1-11
A	刘镇清. “测量超声波速度的相位谱方法” 声学技术, 第12卷, 第02期, 1993年 5月 5日 (1993 - 05 - 05), 第19-22页	1-11
A	陈伟民等. “基于微波雷达的位移/距离测量技术” 电子测量与仪器学报, 第29卷, 第09期, 2015年 9月 15日 (2015 - 09 - 15), 第1251-1265页	1-11

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/119709

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	110231006	A	2019年 9月 13日	无			
SU	1755047	A1	1992年 8月 15日	无			
CN	103676240	A	2014年 3月 26日	CN	103676240	B	2017年 8月 1日
CN	102865839	A	2013年 1月 9日	CN	102865839	B	2015年 7月 1日
CN	108445517	A	2018年 8月 24日	CN	108445517	B	2019年 9月 6日
CN	105004792	A	2015年 10月 28日	无			
CN	109696680	A	2019年 4月 30日	无			
SU	1357708	A1	1987年 12月 7日	无			
JP	2012037294	A	2012年 2月 23日	无			
JP	5871421	A	1983年 4月 28日	JP	S5871421	A	1983年 4月 28日
JP	10300551	A	1998年 11月 13日	JP	H10300551	A	1998年 11月 13日
				JP	3790873	B2	2006年 6月 28日