

(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
2023 年 2 月 2 日 (02.02.2023)



(10) 国际公布号
WO 2023/005248 A1

(51) 国际专利分类号:

G01D 18/00 (2006.01)

(21) 国际申请号:

PCT/CN2022/083899

(22) 国际申请日:

2022 年 3 月 30 日 (30.03.2022)

(25) 申请语言:

中文

(26) 公布语言:

中文

(30) 优先权:

202110865727.6 2021年7月29日 (29.07.2021) CN

(71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310013 (CN)。

(72) 发明人: 冯向东(FENG, Xiangdong); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310013 (CN)。 赵博(ZHAO, Bo); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310013 (CN)。

(74) 代理人: 杭州浙科专利事务所(普通合伙)(HANGZHOU ZHEKE PATENT AGENCY (GENERAL PARTNERSHIP)); 中国浙江省杭州市拱墅区万达商业中心 4 幢 3 单元 1019 室 孙孟辉, Zhejiang 310018 (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, IT, JM, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, 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)。

根据细则 4.17 的声明:

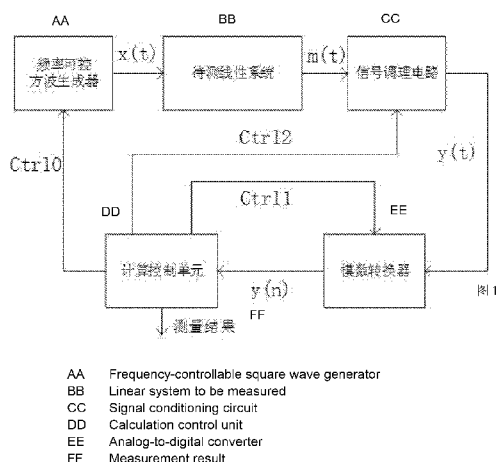
— 发明人资格(细则 4.17(iv))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

(54) Title: FREQUENCY RESPONSE MEASUREMENT SYSTEM BASED ON HARMONIC WAVE, AND METHOD

(54) 发明名称: 一种基于谐波的频率响应测量系统与方法



(57) Abstract: A frequency response measurement system based on a harmonic wave. A square wave having a duty cycle of 50% is used as a measurement signal, the oversampling rate of an analog-to-digital converter in the measurement system is set to be a half integer, and frequency responses, on multiple frequency points, of a linear system to be measured are obtained by means of one mathematical operation. Further disclosed is a method for performing frequency response measurement using the frequency response measurement system based on the harmonic wave. The measurement system and method have the advantages of high measurement efficiency and low measurement cost.

(57) 摘要: 一种基于谐波的频率响应测量系统, 利用占空比为 50% 的方波作为测量信号, 把测量系统中的模数转换器过采样率设置为半整数, 通过数学运算一次得到待测线性系统在多个频点上的频率响应。还公开了一种利用基于谐波的频率响应测量系统进行频率响应测量的方法。测量系统和方法具有测量效率高、测量成本低的优点。

WO 2023/005248 A1

一种基于谐波的频率响应测量系统及方法

技术领域

本发明属于线性系统频率响应测量技术领域，尤其涉及一种基于谐波的频率响应测量系统及方法。

背景技术

线性系统广泛存在。测量线性系统频率响应很重要。

测量线性系统频率响应，常用的方法有点频法、扫频法等。点频法和扫频法都是使用正弦信号作为测量信号输入待测线性系统。施加一次正弦信号进行一次测量，只能得到一个频点上的频率响应。而且，点频法和扫频法都需要正弦波产生电路，而正弦波产生电路比起方波产生电路，具有电路更复杂、成本更高等缺点。

所以，点频法和扫频法存在着测量效率相对较低、测量成本相对较高的问题。它们不能应用在对测量效率或测量成本有高要求的场景。

发明内容

本发明目的在于提供一种基于谐波的频率响应测量系统及方法，以解决点频法和扫频法存在的测量效率相对较低、测量成本相对较高的技术问题。

为解决上述技术问题，本发明的一种基于谐波的频率响应测量系统及方法的具体技术方案如下：

一种基于谐波的频率响应测量系统，包括：

一个频率可控方波生成器，输入是计算控制单元输出的控制信号 C_{tr10} ，输出是方波信号 $x(t)$ ；

一个待测线性系统，输入是频率可控方波生成器输出的方波 $x(t)$ ，输出 $m(t)$ 接入信号调理电路；

一个信号调理电路，输入是待测线性系统的输出 $m(t)$ 和计算控制单元输出的控制信号 $Ctrl2$ ，输出 $y(t)$ 接入模数转换器；

一个模数转换器，输入是信号调理电路的输出 $y(t)$ 和计算控制单元输出的控制信号 $Ctrl1$ ，输出码字 $y(n)$ 接入计算处理单元；

一个计算处理单元，输入是模数转换器输出的码字 $y(n)$ ，输出控制信号 $Ctrl0$ 、 $Ctrl1$ 和 $Ctrl2$ 分别接入频率可控方波生成器、模数转换器和信号调理电路，并输出测量结果。

本发明还公开了一种基于谐波的频率响应测量方法，包括若干个测量轮次，每个测量轮次包括以下四个步骤：

第一步，根据目标测量频率，计算控制单元设定方波生成器生成的方波频率 f_0 和方波幅度等参数，设定信号调理电路的低通截止频率 f_c 和模数转换器过采样率 OSR ，启动方波生成器，其中过采样率 OSR 是半整数；

第二步，计算处理单元调整信号调理电路的增益 A_v ，保证模数转换器的输入处在接近满量程、未饱和的状态；

第三步，计算处理单元对模数转换器输出的结果 $y(n)$ 进行 K 点 DFT 计算，得到在频率点 f_0 、 $3f_0$ 、 $5f_0$ 、 $\dots$ 、 Mf_0 处信号 $y(t)$ 的频谱数据 $Y(f_0)$ 、 $Y(3f_0)$ 、 $Y(5f_0)$ 、 $\dots$ 、 $Y(Mf_0)$ ，其中 M 是奇数且满足 $M < OSR$ ；

第四步，计算处理单元用 $Y(f_0)$ 、 $Y(3f_0)$ 、 $Y(5f_0)$ 、 $\dots$ 、 $Y(Mf_0)$ 分别除以信号调理电路的增益 $A_v(f_0)$ 、 $A_v(3f_0)$ 、 $A_v(5f_0)$ 、 $\dots$ 、 $A_v(Mf_0)$ ，再分别除以信号 $x(t)$ 的 K 点 DFT 频谱数据 $X(f_0)$ 、 $X(3f_0)$ 、 $X(5f_0)$ 、 $\dots$ 、 $X(Mf_0)$ ，分别得到待测线性系统在频率点 f_0 、 $3f_0$ 、 $5f_0$ 、 $\dots$ 、 Mf_0 处的频率响应 $H(f_0)$ 、 $H(3f_0)$ 、 $H(5f_0)$ 、 $\dots$ 、 $H(Mf_0)$ 。

进一步地，所述频率可控方波生成器，生成的方波幅度、频率 f_0 和相位等参数精确定义，方波频率 f_0 可调，由计算控制单元输出的控制信号 $Ctrl0$

决定。

进一步地，所述信号调理电路，对输入信号 $m(t)$ 进行线性放大和低通滤波，它的增益 A_V 可调、低通滤波的截止频率 f_C 可调，由计算控制单元输出的控制信号 $Ctrl2$ 决定。

进一步地，所述模数转换器，其采样频率 f_s 由计算控制单元输出的控制信号 $Ctrl1$ 决定，与方波频率 f_0 之间满足 $f_s = K \times f_0$ ，其中 K 是奇数。

进一步地，所述计算处理单元，可以进行数学运算，可以输出控制信号，可以读取外部数字码字输入，它输出控制信号 $Ctrl0$ 接入频率可控方波生成器，控制方波频率等参数；输出控制信号 $Ctrl1$ 接入模数转换器，控制模数转换器采样频率；输出控制信号 $Ctrl2$ 接入信号调理电路，控制信号调理电路的增益 A_V 和低通截止频率 f_C ；并输出测量结果。

进一步地，所述 $M < K/2$ 。

本发明的一种基于谐波的频率响应测量系统及方法具有以下优点：通过一次测量可以得到待测线性系统多个频点上的频率响应；使用方波生成器而不是正弦波产生电路，简化了电路，降低了成本。

附图说明

图 1 是本发明的一种基于谐波的频率响应测量系统基本框架示意图。

图 2 是本发明一种基于谐波的频率响应测量方法主要步骤示意图。

图 3 是本发明具体实施例基本框架示意图。

具体实施方式

为了更好地了解本发明的目的、结构及功能，下面结合附图，对本发明一种基于谐波的频率响应测量系统及方法做进一步详细的描述。

如图 1 所示，一种基于谐波的频率响应测量系统包括：

一个频率可控方波生成器，输入是计算控制单元输出的控制信号 $Ctrl0$ ，

输出是方波信号 $x(t)$;

一个待测线性系统, 输入是频率可控方波生成器输出的方波 $x(t)$, 输出 $m(t)$ 接入信号调理电路;

一个信号调理电路, 输入是待测线性系统的输出 $m(t)$ 和计算控制单元输出的控制信号 $Ctrl2$, 输出 $y(t)$ 接入模数转换器;

一个模数转换器, 输入是信号调理电路的输出 $y(t)$ 和计算控制单元输出的控制信号 $Ctrl1$, 输出码字 $y(n)$ 接入计算处理单元;

一个计算处理单元, 输入是模数转换器输出的码字 $y(n)$, 输出控制信号 $Ctrl0$ 、 $Ctrl1$ 和 $Ctrl2$ 分别接入频率可控方波生成器、模数转换器和信号调理电路, 并输出测量结果。

如图 2 所示, 本发明的一种基于谐波的频率响应测量方法可以包括若干个测量轮次, 每个测量轮次主要包括以下四个步骤:

第一步, 根据目标测量频率, 计算控制单元设定方波生成器生成的方波频率 f_0 和方波幅度等参数, 设定信号调理电路的低通截止频率 f_c 和模数转换器过采样率 OSR , 启动方波生成器, 其中过采样率 OSR 是半整数;

第二步, 计算处理单元调整信号调理电路的增益 A_v , 保证模数转换器的输入处在接近满量程、未饱和的状态;

第三步, 计算处理单元对模数转换器输出的结果 $y(n)$ 进行 K 点 DFT 计算, 得到在频率点 f_0 、 $3f_0$ 、 $5f_0$ 、 $\dots\dots Mf_0$ 处信号 $y(t)$ 的频谱数据 $Y(f_0)$ 、 $Y(3f_0)$ 、 $Y(5f_0)$ 、 $\dots\dots Y(Mf_0)$, 其中 M 是奇数且满足 $M < OSR$;

第四步, 计算处理单元用 $Y(f_0)$ 、 $Y(3f_0)$ 、 $Y(5f_0)$ 、 $\dots\dots Y(Mf_0)$ 分别除以信号调理电路的增益 $A_v(f_0)$ 、 $A_v(3f_0)$ 、 $A_v(5f_0)$ 、 $\dots\dots A_v(Mf_0)$, 再分别除以信号 $x(t)$ 的 K 点 DFT 频谱数据 $X(f_0)$ 、 $X(3f_0)$ 、 $X(5f_0)$ 、 $\dots\dots X(Mf_0)$, 分别得到待测线性系统在频率点 f_0 、 $3f_0$ 、 $5f_0$ 、 $\dots\dots Mf_0$ 处的频率响应 $H(f_0)$ 、

$H(3f_0)$ 、 $H(5f_0)$ 、…… $H(Mf_0)$ 。

优选地，所述频率可控方波生成器，生成的方波幅度、频率 f_0 和相位等参数精确定义，方波频率 f_0 可调，由计算控制单元输出的控制信号 Ctr10 决定。

优选地，所述信号调理电路，对输入信号 $m(t)$ 进行线性放大和低通滤波。它的增益 A_V 可调、低通滤波的截止频率 f_c 可调，由计算控制单元输出的控制信号 Ctr12 决定。

优选地，所述模数转换器，其采样频率 f_s 由计算控制单元输出的控制信号 Ctr11 决定，与方波频率 f_0 之间满足 $f_s = K \times f_0$ ，其中 K 是奇数。

优选地，所述计算处理单元，可以进行数学运算，可以输出控制信号，可以读取外部数字码字输入。它输出控制信号 Ctr10 接入频率可控方波生成器，控制方波频率等参数；输出控制信号 Ctr11 接入模数转换器，控制模数转换器采样频率；输出控制信号 Ctr12 接入信号调理电路，控制信号调理电路的增益 A_V 和低通截止频率 f_c ；并输出测量结果。

优选地，上述测量方法中的参数 M 是奇数，且满足 $M < K/2$ 。

上述测量系统和方法具有如下优点：通过一次测量可以得到待测线性系统多个频点上的频率响应；使用方波生成器而不是正弦波产生电路，简化了电路，降低了成本。

如果需要测量某线性系统许多频点上的频率响应，可以重复上述步骤，每次设定不同的方波频率 f_0 和低通截止频率 f_c 等参数。

上述测量系统和方法能一次测出待测线性系统多个频点上频率响应的原理是，基于线性电路的叠加定理和占空比为 50% 的方波的频谱特点，利用方波的基波和低次谐波来测量系统频率响应，通过对模数转换器过采样率的设置来消除可能的高次谐波频谱混叠。

记待测线性系统频率响应为 $H(f)$ ，记信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 在频率点 jf_0 处的傅里叶系数分别为 $X(jf_0)$ 、 $Y(jf_0)$ ，记信号调理电路在频率点 jf_0 处的增益为 $A_v(jf_0)$ ，其中 $j=1, 2, \dots, M$ 。 $X(jf_0)$ 、 $Y(jf_0)$ 、 $A_v(jf_0)$ 是复数，包含幅度和相位。有

$$Y(jf_0) = A_v(jf_0)X(jf_0)H(jf_0)$$

其中， $j = 1, 2, \dots, M$ （公式 1）

记 $y(n)$ 作 K 点 DFT 计算之后的结果是 $Y_F(jf_0)$ ， $j = 1, 2, \dots, M$ 。

于是有

$$\frac{Y_F(f_0)}{K} = Y(f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((i \cdot K - 1)f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((i \cdot K + 1)f_0) \quad (\text{公式 2})$$

$$\frac{Y_F(3f_0)}{K} = Y(3f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((i \cdot K - 3)f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((i \cdot K + 3)f_0) \quad (\text{公式 3})$$

.....

$$\frac{Y_F(Mf_0)}{K} = Y(Mf_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((i \cdot K - M)f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((i \cdot K + M)f_0) \quad (\text{公式 4})$$

4)

由于我们限定测量信号 $x(t)$ 的占空比为 50%，信号 $x(t)$ 的频谱具有偶次谐波能量为 0 的特点，即

$$X(mf_0) = 0, m = 2, 4, \dots, \infty \quad (\text{公式 5})$$

联立公式 1 和公式 5，我们可以得到信号 $y(t)$ 的偶数次谐波能量也为 0，即

$$Y(mf_0) = 0, m = 2, 4, \dots, \infty \quad (\text{公式 6})$$

由于设定 K 和 M 都是奇数，所以 $y(t)$ 中的 $K-1$ 、 $K+1$ 、 $3K-1$ 、 $3K+1$ 等偶次谐波能量为 0。于是有

$$\frac{Y_F(f_0)}{K} = Y(f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((2 \cdot i \cdot K - 1)f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((2 \cdot i \cdot K + 1)f_0) \quad (\text{公$$

式 7)

类似地, 有

$$\frac{Y_F(3f_0)}{K} = Y(3f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((2 \cdot i \cdot K - 3)f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((2 \cdot i \cdot K + 3)f_0)$$

(公式 8)

.....

$$\frac{Y_F(Mf_0)}{K} = Y(Mf_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((2 \cdot i \cdot K - M)f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} Y((2 \cdot i \cdot K + M)f_0)$$

(公式 9)

根据公式 1 可得

$$\left| \frac{Y((2 \cdot i \cdot K - 1)f_0)}{Y(f_0)} \right| = \left| \frac{X((2 \cdot i \cdot K - 1)f_0)H((2 \cdot i \cdot K - 1)f_0)A_V((2 \cdot i \cdot K - 1)f_0)}{X(f_0)H(f_0)A_V(f_0)} \right| \quad (\text{公式 10})$$

由于设定测量信号 $x(t)$ 的占空比为 50%, 根据信号与系统知识, 我们可以得到

$$\left| \frac{X((2 \cdot i \cdot K - 1)f_0)}{X(f_0)} \right| = \frac{1}{2 \cdot i \cdot K - 1} \quad (\text{公式 11})$$

由于低通滤波, $|A_V((2 \cdot i \cdot K - 1)f_0)| \ll |A_V(f_0)|$, 且公式 11 中的比值是一个很小的数, 于是公式 10 中的比值接近于 0。于是公式 7 中 $y(t)$ 的 $2K-1$ 、 $2K+1$ 以及更高次的奇数次谐波可以忽略。类似的, 公式 8 和公式 9 中的奇数次谐波也可以忽略。

所以, 频谱混叠带来的影响可以忽略不记。

于是有

$$\frac{Y_F(f_0)}{K} = Y(f_0) \quad (\text{公式 12})$$

$$\frac{Y_F(3f_0)}{K} = Y(3f_0) \quad (\text{公式 13})$$

.....

$$\frac{Y_F(Mf_0)}{K} = Y(Mf_0) \quad (\text{公式 14})$$

于是利用以下公式 15 即可求得待测线性系统的频率响应。

$$H(jf_0) = \frac{Y(jf_0)}{A_V(jf_0)X(jf_0)}$$

其中, $j = 1, 2, \dots, M$ (公式 15)

本实施例中, 我们测试一个线性系统在 1kHz-10kHz 内的频率响应。实施例的系统结构框图如图 3 所示。频率可控方波生成器采用 555 定时器结合电阻阵列来实现; 信号调理电路采用程控放大器和程控滤波器, 计算控制单元采用 stm32 单片机。

使用本发明提出的测量系统和方法, 具体测量过程如下。

第一轮:

第一步, stm32 单片机设定方波生成器生成的方波频率为 1kHz, 设定程控滤波器低通截止频率为 33kHz, 设定模数转换器过采样率为 49.5, 启动方波生成器;

第二步, stm32 单片机调整程控放大器的增益, 保证模数转换器处在接近满量程、未饱和的状态, 记录此时程控放大器和程控滤波器的级联增益 A_V ;

第三步, stm32 单片机对数字信号 $y(n)$ 做 99 点 DFT, 得到 $y(t)$ 在 1kHz、3kHz、5kHz、7kHz、9kHz 这 5 个频率点上的频谱数据 Y_1 、 Y_3 、 Y_5 、 Y_7 、 Y_9 ;

第四步, stm32 单片机用 Y_1 、 Y_3 、 Y_5 、 Y_7 、 Y_9 分别除以程控放大器和程控滤波器在 1kHz、3kHz、5kHz、7kHz、9kHz 这 5 个频率点上的级联增益 A_{V1} 、 A_{V3} 、 A_{V5} 、 A_{V7} 、 A_{V9} , 再分别除以对 $x(t)$ 作 99 点 DFT 得到的在 1kHz、3kHz、5kHz、7kHz、9kHz 这 5 个频率点上 $x(t)$ 的频谱数据 X_1 、 X_3 、 X_5 、 X_7 、 X_9 , 分别得到待测线性系统在频率点 1kHz、3kHz、5kHz、7kHz、9kHz 这 5 个频率点处的频率响应 H_1 、 H_3 、 H_5 、 H_7 、 H_9 。

第二轮：

第一步，stm32 单片机设定方波生成器生成的方波频率为 2kHz，设定程控滤波器低通截止频率为 66kHz，设定模数转换器过采样率为 49.5，启动方波生成器；

第二步，stm32 单片机调整程控放大器的增益，保证模数转换器处在接近满量程、未饱和的状态，记录此时程控放大器和程控滤波器的级联增益 A_V ；

第三步，stm32 单片机对数字信号 $y(n)$ 做 99 点 DFT，得到 $y(t)$ 在 2kHz、6kHz、10kHz 这 3 个频率点上的频谱数据 Y_2 、 Y_6 、 Y_{10} ；

第四步，stm32 单片机用 Y_2 、 Y_6 、 Y_{10} 分别除以程控放大器和程控滤波器在 2kHz、6kHz、10kHz 这 3 个频率点上的级联增益 A_{V2} 、 A_{V6} 、 A_{V10} ，再分别除以对 $x(t)$ 作 99 点 DFT 得到的在 2kHz、6kHz、10kHz 这 3 个频率点上 $x(t)$ 的频谱数据 X_2 、 X_6 、 X_{10} ，分别得到待测线性系统在频率点 2kHz、6kHz、10kHz 这 3 个频率点处的频率响应 H_2 、 H_6 、 H_{10} 。

上述两轮测量，得到了待测线性系统在 1kHz、2kHz、3kHz、5kHz、6kHz、7kHz、9kHz、10kHz 这 8 个频率点上的频率响应。

使用本发明所示测量系统和方法，只需 2 次测量即可获得 8 个频率点上的频率响应。按照传统测量方法，需要测 8 次。本例中，本发明提出的测量系统和方法效率是传统点频法、扫频法的 4 倍。同时，本实施例中用 555 定时器结合电阻阵列取代正弦波生成电路，具有成本更低的优点。

由以上实施例可以看出，本发明提出的测量系统和方法，具有测量效率高、测量成本低的优势。

可以理解，本发明是通过一些实施例进行描述的，本领域技术人员知悉的，在不脱离本发明的精神和范围的情况下，可以对这些特征和实施例进行各种改变或等效替换。另外，在本发明的教导下，可以对这些特征和实施例

进行修改以适应具体的情况及材料而不会脱离本发明的精神和范围。因此，本发明不受此处所公开的具体实施例的限制，所有落入本申请的权利要求范围内的实施例都属于本发明所保护的范围内。

权 利 要 求 书

1. 一种基于谐波的频率响应测量系统，其特征在于，包括：

一个频率可控方波生成器，输入是计算控制单元输出的控制信号 Ctrl0，输出是方波信号 $x(t)$ ；

一个待测线性系统，输入是频率可控方波生成器输出的方波 $x(t)$ ，输出 $m(t)$ 接入信号调理电路；

一个信号调理电路，输入是待测线性系统的输出 $m(t)$ 和计算控制单元输出的控制信号 Ctrl12，输出 $y(t)$ 接入模数转换器；

一个模数转换器，输入是信号调理电路的输出 $y(t)$ 和计算控制单元输出的控制信号 Ctrl11，输出码字 $y(n)$ 接入计算处理单元；

一个计算处理单元，输入是模数转换器输出的码字 $y(n)$ ，输出控制信号 Ctrl0、Ctrl11 和 Ctrl12 分别接入频率可控方波生成器、模数转换器和信号调理电路，并输出测量结果。

2. 一种利用如权利要求 1 所述的基于谐波的频率响应测量系统进行频率响应测量的方法，其特征在于，包括若干个测量轮次，每个测量轮次包括以下四个步骤：

第一步，根据目标测量频率，计算控制单元设定方波生成器生成的方波频率 f_0 和方波幅度等参数，设定信号调理电路的低通截止频率 f_c 和模数转换器过采样率 OSR，启动方波生成器，其中过采样率 OSR 是半整数；

第二步，计算处理单元调整信号调理电路的增益 A_v ，保证模数转换器的输入处在接近满量程、未饱和的状态；

第三步，计算处理单元对模数转换器输出的结果 $y(n)$ 进行 K 点 DFT

计算, 得到在频率点 f_0 、 $3f_0$ 、 $5f_0$ 、..... Mf_0 处信号 $y(t)$ 的频谱数据 $Y(f_0)$ 、 $Y(3f_0)$ 、 $Y(5f_0)$ 、..... $Y(Mf_0)$, 其中 M 是奇数且满足 $M < OSR$;

第四步, 计算处理单元用 $Y(f_0)$ 、 $Y(3f_0)$ 、 $Y(5f_0)$ 、..... $Y(Mf_0)$ 分别除以信号调理电路的增益 $A_v(f_0)$ 、 $A_v(3f_0)$ 、 $A_v(5f_0)$ 、..... $A_v(Mf_0)$, 再分别除以信号 $x(t)$ 的 K 点 DFT 频谱数据 $X(f_0)$ 、 $X(3f_0)$ 、 $X(5f_0)$ 、..... $X(Mf_0)$, 分别得到待测线性系统在频率点 f_0 、 $3f_0$ 、 $5f_0$ 、..... Mf_0 处的频率响应 $H(f_0)$ 、 $H(3f_0)$ 、 $H(5f_0)$ 、..... $H(Mf_0)$ 。

3. 根据权利要求 2 所述的基于谐波的频率响应测量方法, 其特征在于, 所述频率可控方波生成器, 生成的方波幅度、频率 f_0 和相位等参数精确定义, 方波频率 f_0 可调, 由计算控制单元输出的控制信号 Ctr10 决定。
4. 根据权利要求 2 所述的基于谐波的频率响应测量方法, 其特征在于, 所述信号调理电路, 对输入信号 $m(t)$ 进行线性放大和低通滤波, 它的增益 A_v 可调、低通滤波的截止频率 f_c 可调, 由计算控制单元输出的控制信号 Ctr12 决定。
5. 根据权利要求 2 所述的基于谐波的频率响应测量方法, 其特征在

于,所述模数转换器,其采样频率 f_s 由计算控制单元输出的控制信号 Ctrl11 决定,与方波频率 f_0 之间满足 $f_s = K \times f_0$,其中 K 是奇数。

6. 根据权利要求 2 所述的基于谐波的频率响应测量方法,其特征在于,所述计算处理单元,可以进行数学运算,可以输出控制信号,可以读取外部数字码字输入,它输出控制信号 Ctrl10 接入频率可控方波生成器,控制方波频率等参数;输出控制信号 Ctrl11 接入模数转换器,控制模数转换器采样频率;输出控制信号 Ctrl12 接入信号调理电路,控制信号调理电路的增益 A_v 和低通截止频率 f_c ;并输出测量结果。

7. 根据权利要求 2 所述的基于谐波的频率响应测量方法,其特征在于,所述 $M < K/2$ 。

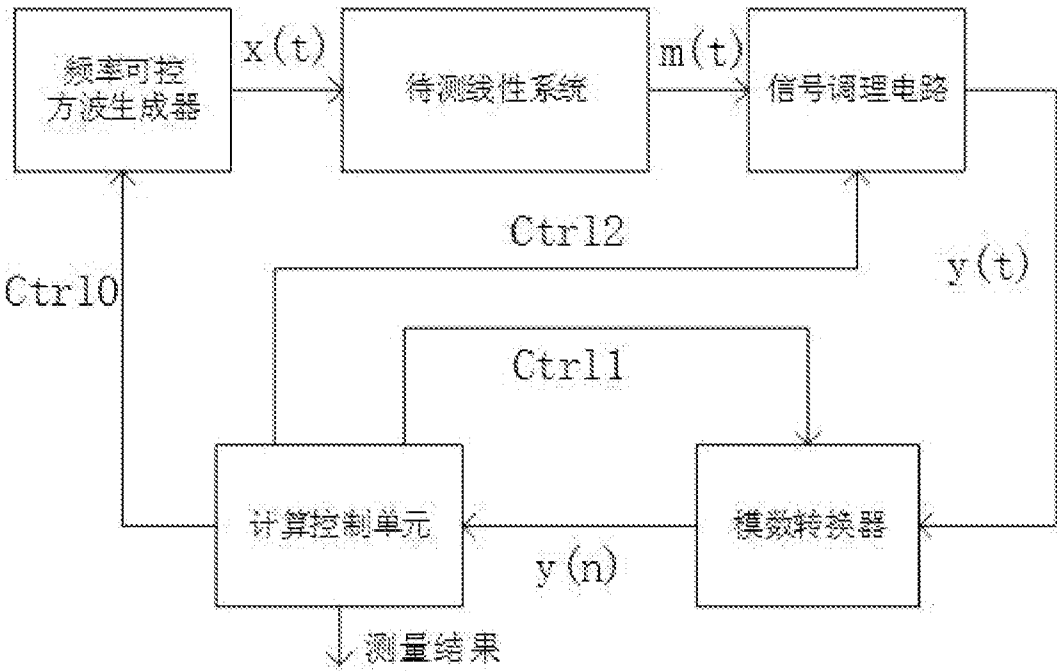


图 1

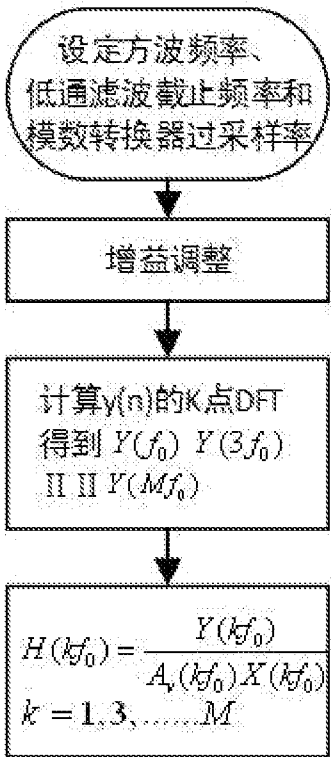


图 2

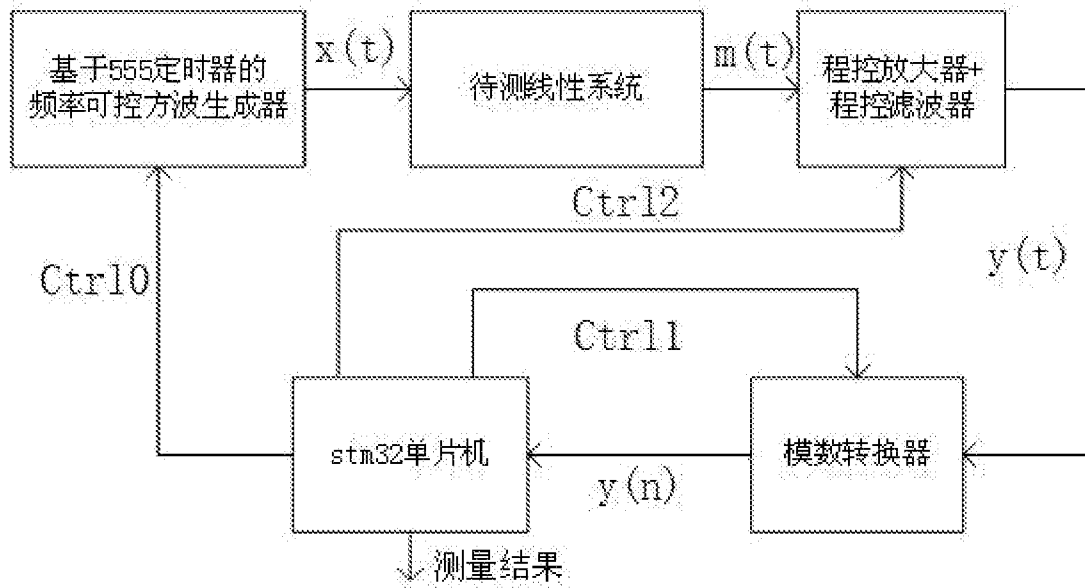


图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/083899

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01D 18/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01D; G01R

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)

CNABS, WPABS, DWPI, CNTXT, CNKI: 方波, 扫频, 频率响应, 频响, 频率特性, 放大, 滤波, square, wave, frequency, sweep, amplif+, filter+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 113624269 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 09 November 2021 (2021-11-09) claims 1-7, and description, paragraphs 0005-0094, and figures 1-3	1-7
X	CN 101034130 A (SHANGHAI SUNSTAR TELECOM TECHNOLOGY CO., LTD.) 12 September 2007 (2007-09-12) description, page 6, paragraph 16-page 14, paragraph 2, and figures 1-10	1
X	CN 110297126 A (INSTITUTE OF METAL RESEARCH, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 01 October 2019 (2019-10-01) description, paragraphs 0004-0033, and figure 2	1
Y	CN 101034130 A (SHANGHAI SUNSTAR TELECOM TECHNOLOGY CO., LTD.) 12 September 2007 (2007-09-12) description, page 6, paragraph 16-page 14, paragraph 2, and figures 1-10	2-7
Y	CN 110297126 A (INSTITUTE OF METAL RESEARCH, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 01 October 2019 (2019-10-01) description, paragraphs 0004-0033, and figure 2	2-7
Y	US 2018180652 A1 (TEXAS INSTRUMENTS INC.) 28 June 2018 (2018-06-28) description, paragraphs 0017-008	2-7

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ 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

21 June 2022

Date of mailing of the international search report

30 June 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/083899**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 203772956 U (NANJING UNIVERSITY OF INFORMATION SCIENCE & TECHNOLOGY) 13 August 2014 (2014-08-13) entire document	1-7
A	JP 10260066 A (AKIYUUTO K.K.) 29 September 1998 (1998-09-29) entire document	1-7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/083899

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	113624269	A	09 November 2021	None			
CN	101034130	A	12 September 2007	None			
CN	110297126	A	01 October 2019	None			
US	2018180652	A1	28 June 2018	None			
CN	203772956	U	13 August 2014	None			
JP	10260066	A	29 September 1998	JP	H10260066	A	29 September 1998

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/083899

A. 主题的分类 G01D 18/00 (2006.01) i 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																													
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G01D; G01R 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 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)) CNABS, WPABS, DWPI, CNTXT, CNKI: 方波, 扫频, 频率响应, 频响, 频率特性, 放大, 滤波, square, wave, frequency, sweep, amplif+, filter+																													
C. 相关文件 <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 113624269 A (浙江大学) 2021年11月9日 (2021 - 11 - 09) 权利要求1-7, 说明书0005-0094段, 图1-3</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>CN 101034130 A (上海欣泰通信技术有限公司) 2007年9月12日 (2007 - 09 - 12) 说明书第6页第16段-第14页第2段, 图1-10</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>CN 110297126 A (中国科学院金属研究所) 2019年10月1日 (2019 - 10 - 01) 说明书0004-0033段, 图2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 101034130 A (上海欣泰通信技术有限公司) 2007年9月12日 (2007 - 09 - 12) 说明书第6页第16段-第14页第2段, 图1-10</td> <td>2-7</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 110297126 A (中国科学院金属研究所) 2019年10月1日 (2019 - 10 - 01) 说明书0004-0033段, 图2</td> <td>2-7</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>US 2018180652 A1 (TEXAS INSTRUMENTS INC) 2018年6月28日 (2018 - 06 - 28) 说明书0017-008段</td> <td>2-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 203772956 U (南京信息工程大学) 2014年8月13日 (2014 - 08 - 13) 全文</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 10260066 A (AKIYUUTO KK) 1998年9月29日 (1998 - 09 - 29) 全文</td> <td>1-7</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 113624269 A (浙江大学) 2021年11月9日 (2021 - 11 - 09) 权利要求1-7, 说明书0005-0094段, 图1-3	1-7	X	CN 101034130 A (上海欣泰通信技术有限公司) 2007年9月12日 (2007 - 09 - 12) 说明书第6页第16段-第14页第2段, 图1-10	1	X	CN 110297126 A (中国科学院金属研究所) 2019年10月1日 (2019 - 10 - 01) 说明书0004-0033段, 图2	1	Y	CN 101034130 A (上海欣泰通信技术有限公司) 2007年9月12日 (2007 - 09 - 12) 说明书第6页第16段-第14页第2段, 图1-10	2-7	Y	CN 110297126 A (中国科学院金属研究所) 2019年10月1日 (2019 - 10 - 01) 说明书0004-0033段, 图2	2-7	Y	US 2018180652 A1 (TEXAS INSTRUMENTS INC) 2018年6月28日 (2018 - 06 - 28) 说明书0017-008段	2-7	A	CN 203772956 U (南京信息工程大学) 2014年8月13日 (2014 - 08 - 13) 全文	1-7	A	JP 10260066 A (AKIYUUTO KK) 1998年9月29日 (1998 - 09 - 29) 全文	1-7
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																											
PX	CN 113624269 A (浙江大学) 2021年11月9日 (2021 - 11 - 09) 权利要求1-7, 说明书0005-0094段, 图1-3	1-7																											
X	CN 101034130 A (上海欣泰通信技术有限公司) 2007年9月12日 (2007 - 09 - 12) 说明书第6页第16段-第14页第2段, 图1-10	1																											
X	CN 110297126 A (中国科学院金属研究所) 2019年10月1日 (2019 - 10 - 01) 说明书0004-0033段, 图2	1																											
Y	CN 101034130 A (上海欣泰通信技术有限公司) 2007年9月12日 (2007 - 09 - 12) 说明书第6页第16段-第14页第2段, 图1-10	2-7																											
Y	CN 110297126 A (中国科学院金属研究所) 2019年10月1日 (2019 - 10 - 01) 说明书0004-0033段, 图2	2-7																											
Y	US 2018180652 A1 (TEXAS INSTRUMENTS INC) 2018年6月28日 (2018 - 06 - 28) 说明书0017-008段	2-7																											
A	CN 203772956 U (南京信息工程大学) 2014年8月13日 (2014 - 08 - 13) 全文	1-7																											
A	JP 10260066 A (AKIYUUTO KK) 1998年9月29日 (1998 - 09 - 29) 全文	1-7																											
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																													
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “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) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “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 “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 “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 “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 “&” 同族专利的文件																													
国际检索实际完成的日期 2022年6月21日		国际检索报告邮寄日期 2022年6月30日																											
ISA/CN的名称和邮寄地址 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 传真号 (86-10) 62019451		受权官员 宋艳杰 电话号码 (86-10) 62089683																											

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/083899

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	113624269	A	2021年11月9日	无	
CN	101034130	A	2007年9月12日	无	
CN	110297126	A	2019年10月1日	无	
US	2018180652	A1	2018年6月28日	无	
CN	203772956	U	2014年8月13日	无	
JP	10260066	A	1998年9月29日	JP H10260066 A	1998年9月29日