



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103686530 A

(43) 申请公布日 2014. 03. 26

(21) 申请号 201310315155. X

(22) 申请日 2013. 07. 24

(30) 优先权数据

1258116 2012. 08. 30 FR

(71) 申请人 鸚鵡股份有限公司

地址 法国巴黎

(72) 发明人 V·翁珂推

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公

司 31100

代理人 钱慰民

(51) Int. Cl.

H04R 3/00(2006. 01)

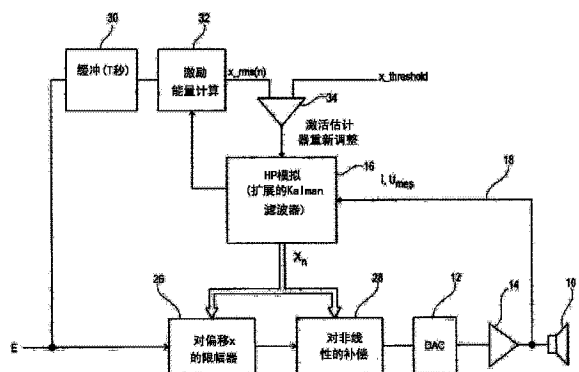
权利要求书1页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

通过对电动扬声器的总响应建模来处理音频信号的方法

(57) 摘要

一种通过对电动扬声器的总响应建模来处理音频信号的方法。该方法包括：确定观察矢量，该观察矢量仅包括在扬声器端子处的电压 (U<sub>mes</sub>) 以及流过扬声器的电流 (i) 的电气测量；以及状态矢量 (X)，其分量包括：扬声器响应的线性参数的值，例如电气 (R<sub>e</sub>) 和机械 (R<sub>eq</sub>) 电阻；以及非线性参数的多项式系数，例如力因数 (BI)、等效刚度 (K<sub>eq</sub>) 和电感 (L<sub>e</sub>)。将电压和电流测量值施加至估计器，该估计器具有扩展的 Kalman 滤波器的预测性滤波器，该扩展的 Kalman 滤波器包括扬声器的动态模型的表征。该滤波器执行状态矢量 (X) 的预测并通过基于所述状态矢量和测得的电流计算电压估计 (U<sub>est</sub>) 并将该估计与所述电压测量 (U<sub>mes</sub>) 比较来重新调整该预测。



1. 一种处理旨在由包括电动扬声器的设备再现的数字音频信号的方法,因变于施加于其端子的电信号的所述电动扬声器的总响应由一组电气、机械和声学参数定义,

所述方法包括:

a) 观察矢量的确定仅包括电气参数的测量,通过:

- . 在所述扬声器端子处的电压 (U) 的测量,以及
- . 流过扬声器的电流 (i) 的测量;

b) 通过将电压和电流测量施加至包含扬声器的动态模型表征的预测性滤波器估计器来确定状态矢量 (X),

该预测性滤波器是扩展的 Kalman 滤波器,其适于:

- . 运行所述状态矢量 (X) 的预测,以及
- . 通过基于所述状态矢量和测得的电流计算电压 (U<sub>est</sub>) 估计并将该估计与所述电压测量 (U<sub>mes</sub>) 比较来重新调整该预测;以及

c) 将因变于所述状态矢量 (X) 的处理应用至所述音频信号,其特征在于,所述状态矢量的分量包括:

- 包含在下组中的扬声器响应的线性参数值:电阻 ( $R_e$ ) 和机械强度 ( $R_{eq}$ ),以及
- . 包含在下组中的扬声器响应的非线性参数的多项式系数:力因数 ( $BI_0, BI_1, BI_2$ )、等效刚度 ( $K_{eq0}, K_{eq1}, K_{eq2}$ ) 以及电感 ( $L_{e0}, L_{e1}, L_{e2}, L_{e3}, L_{e4}$ )。

2. 如权利要求 1 所述的方法,其特征在于,施加至所述音频信号的所述处理是对扬声器响应的非线性进行补偿的处理,如基于由所述预测性滤波器估计器传递的状态矢量确定的那样。

3. 如权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述施加至音频信号的处理包括:

c1) 因变于 (i) 所述音频信号的放大增益和 (ii) 基于由所述预测性滤波器估计器传递的状态矢量确定的扬声器响应来计算所述扬声器的当前偏移值 (x);

c2) 将如此计算出的当前偏移值与最大偏移值进行比较;以及

c3) 在所述当前偏移值超出所述最大偏移值的情形下计算所述放大增益的可能衰减。

4. 如权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述状态矢量 (X) 的分量进一步包括表示与设有减压通气口的后音腔关联的扬声器响应的附加声学参数的值。

5. 如权利要求 1 所述的方法,其特征在于,步骤 (b) 的状态矢量的确定是基于步骤 (c) 的处理的当前音频信号对象在飞行中进行的并在该音频信号再现期间通过扬声器端子处的电气参数的收集由所述扬声器再现。

6. 如权利要求 5 所述的方法,其特征在于,包括下列步骤:

- 记住预定期间内音频信号的采样的序列;
- 分析所述序列以计算所记住的音频信号的能量的参数;
- 如果计算出的能量参数高于预定阈值,则激活通过所述预测性滤波器的估计;
- 在相反的情形下,抑制由所述预测性滤波器作出的估计并保持所述状态矢量的之前估计的值。

## 通过对电动扬声器的总响应建模来处理音频信号的方法

### 发明领域

[0001] 本发明涉及一种基于旨在再现音频信号的扬声器的总响应的估计处理该音频信号的技术,即将表征该响应的所有电、机械和声学参数考虑在内。

### 背景技术

[0002] 事项是当将音频信号放大后施加于扬声器时对扬声器的物理性质建模以模拟其操作,由此可在上游对该音频信号执行各种校正处理操作以优化被呈现给收听者的最终声音再现的质量。

[0003] 尤其,目前要巩固低频以补偿下面的事实:专用于这种记录器(register)的扬声器或低音扩音器(一般被安装在开式(通气系统)或闭式隔音板内),在呈现最低频率时一直或多或少地受到限制,其下限(被称为隔音板截止频率)依赖于扬声器尺寸、隔音板的体积以及所使用的安装类型。

[0004] 然而,如果电信号的电平在低频率下通过适当的模拟或数字滤波而增加,则扬声器隔膜的偏移——即其相对于平衡位置的位移幅度——很快变得过高,带来了损坏扬声器的风险,最低限度来说,对于过度的偏移值,会引入使音频信号的呈现质量快速恶化的失真、限幅和饱和。

[0005] 已知扬声器的总响应允许预期这种风险,以在需要时限制要被再现的信号的电平,以避免产生失真的过度偏移或非线性。

[0006] 另一种能想到的处理在于,对音频信号施加一特定滤波以补偿由扬声器引入的非线性,由此减少音频失真并提供更好的收听质量。

[0007] 事项因而独立于最大偏移的任何限制通过在扬声器/隔音板单元的声音截止频率附近或之下补偿这种记录器中的扬声器响应的物理限制而使扬声器隔膜位移更为线性,尤其是对最低的频率。

[0008] 已知对扬声器的总响应建模的参数对执行这些处理操作来说是必要的。

[0009] 这些参数是通常被称为“Thiele 和 Small”(T/S)的参数,它表述将信号再现涉及的各种电、机械和声音现象以及机-电和机-声转换考虑在内的电动扬声器的建模。扬声器响应,尤其对于低频来说,可通过一组参数描述,它们由扬声器制造者统一参考。

[0010] 然而,这些 T/S 参数既非时间恒定的,也非线性的。

[0011] - 首先,它们容易随着例如扬声器老化、使用期间的受热等随时间漂移;

[0012] - 其次,如果想要具有扬声器性质的精确和真实的建模,必须考虑到这些参数中的某些不是线性的,即它们的值不是固定的但随着瞬时偏移而不断地变化,即扬声器在给定时刻的位置相对于中央平衡位置移动线圈和隔膜。尤其在电感的情形下,它是系统的总机械刚度(隔膜的刚度,其随着隔膜远离其平衡位置而增大)和隔膜驱动“力因数”(联系于线圈间隙的磁场,其随着线圈远离平衡位置而减小)。

[0013] EP 1799013 A1 描述了一种基于 T/S 参数预测扬声器性质的技术,从而补偿扬声器的非线性并减少被呈现给用户的声音信号中引入的音频失真。

[0014] 然而, T/S 参数在这里被认为是不变的,这是先验已知的,由此响应建模是固定的并且无法将参数的缓慢演变考虑在内,例如由于它们因组件老化随时间的漂移。

[0015] US 2003/0142832 A1 描述了一种通过采用梯度下降算法基于流过该扬声器的电流测量适应性地估计扬声器参数(包括非线性参数)的技术。该方法需要在静态校准阶段中参数的之前确定。在这种校准中,通过阻抗的测量针对隔膜的各个位置值(相对于平衡位置的偏移)计算 T/S 参数。此后,将电流的测量值与该同一电流的估计(通过低通滤波器求平方和滤波)比较以计算误差相对于每个参数的导数。该技术也采用最小均方(LSM)类型的梯度下降算法。

[0016] 然而,该方法的缺陷是:它需要具有阻抗测量和预定信号的施加的之前校准阶段,这排除了由公众用户无论以何方式作出对后继参数的重新估计。另一方面,梯度下降的 LMS 类型的简单算法不将无法避免的测量噪声考虑在内,因此估计器在实际使用情形下相当低效。

[0017] US 2008/0189087 A1 描述了另一种估计扬声器参数的技术,它也是梯度下降 LMS 类型的。更具体地,该方法独立地处理线性部分和非线性部分的估计。为了这个目的,由 LMS 算法使用的误差信号(测得信号和预测的信号之间的差)被处理以使线性部分与非线性部分解除关联。该文件也推荐通过在输入处施加一特定的音频信号来实现估计器,该特定的音频信号由梳状滤波器修正,该梳状滤波器选择性地去除某些选定频率。

[0018] 这种技术具有与前面一种相同的缺陷,尤其是基于经修正的输入信号进行校准的必要性容易损害用户收听的舒适感,它不允许以对用户而言透明的方式在音乐收听期间执行估计。

[0019] Linköpings 大学(SE)的电气工程部的 Marcus Arvidsson 和 Daniel Karlsson 2012 年 6 月 18 日的大学论文“Attenuation of Harmonic Distorsion in Loudspeakers Using Non-Linear Control(使用非线性控制的扬声器中的谐波失真的衰减)”(XP055053802)中描述了又一种方法。该方法基于一观察矢量,该观察矢量仅包括电气参数(电压和电流)的测量,这些测量被应用于扩展的 Kalman 预测性滤波器估计器。该估计器执行状态矢量的预测,该状态矢量的分量包括偏移值和扬声器中的电流的值。但这种方法不允许在飞行中估计扬声器响应的线性参数和非线性参数两者以在之后施加合适的校正音频处理。

## 发明内容

[0020] 本发明的问题是可自由处置地具有电动扬声器的总响应的估计器。

[0021] - 它通过对这些参数的周期性重新评价以更可靠和更精确的方式将这种响应的全部非线性以及参数的可能漂移考虑在内;

[0022] - 它既不引入输入信号的修正也不引入输入信号的劣化,这两者均会损害用户的收听舒适度;

[0023] - 其实现不需要之前的校准也不需要施加特定的信号(白噪声等);

[0024] - 它即刻地从任何类型的音乐信号作用,通过使用这种信号“在飞行中”以重新调整估计器的参数——换句话说,它可对用户透明地工作,估计器在播放音乐的同时工作并基于该音乐,无需请求用户播放特定类型的信号以实现扬声器参数估计算法;以及

[0025] - 为了适应一般的公众产品,它仅需要可即刻访问的电气参数的测量(在扬声器端子处的电压以及线圈中的强度),并可用于缺乏发电机传感器(位移传感器、声压传感器等)的传统扬声器——换句话说,隔膜的机械位移(偏移)保持估计器的一未测得的“隐藏变量”。

[0026] 为了那个目的,本发明提出一种用于处理由 Arvidsson 和 Karlsson 的前述大学论文中公开的一般类型数字音频信号的方法,即一种方法,包括:

[0027] a) 观察矢量的确定仅包括电气参数的测量,通过:扬声器端子处的电压的测量以及流过扬声器的电流的测量;

[0028] b) 通过将电压和电流测量施加至包含扬声器的动态模型表征的预测性滤波器估计器来确定状态矢量,

[0029] 该预测性滤波器是扩展的 Kalman 滤波器,其适于:基于电压和强度测量运作状态矢量的预测,并通过计算电压估计并将该估计与电压测量比较来重新调整这种预测;以及

[0030] c) 将因变于所述状态矢量的处理施加至音频信号。

[0031] 作为本发明特征地,状态矢量的分量包括:

[0032] • 包含在下组中的扬声器响应的线性参数值:电阻和机械强度,以及

[0033] • 包含在下组中的扬声器响应的非线性参数的多项式系数:力因数、等效刚度和电感。

[0034] 施加至音频信号的处理特别地可以是对扬声器响应的非线性的补偿的处理,如基于由预测性滤波器估计器传递的状态矢量确定的那样。

[0035] 作为变例或附加,被施加至音频信号的处理可包括:c1) 因变于(i) 音频信号的放大增益、(ii) 基于由预测性滤波器估计器传递的状态矢量确定的扬声器响应,计算扬声器的偏移的当前值;c2) 将如此计算出的当前偏移值与最大偏移值比较;以及 c3) 在当前偏移值超出最大偏移值的情形下计算放大增益的可能衰减。

[0036] 此外,状态矢量的分量可包括表示与设有减压通气口的后音腔关联的扬声器响应的附加声学参数的值。

[0037] 非常有利地,步骤(b)的状态矢量的确定是基于步骤(c)处理的当前音频信号对象在飞行中进行的并在该音频信号再现期间通过扬声器端子处的电气参数的收集由扬声器再现。

[0038] 该方法则可包括以下步骤:记住预定期间内音频信号的采样的序列;分析该序列以计算所记住的音频信号的能量的参数;如果计算出的能量参数高于预定阈值,则激活通过预测性滤波器的估计;在相反的情形下,抑制由预测性滤波器的估计并保持状态矢量的之前估计的值。

[0039] 附图简述

[0040] 现在将参考附图描述本发明的实现的示例,在所有附图中,相同的附图标记指示相同或功能上相似的元素。

[0041] 图 1 是利用对扬声器的总响应建模的各种 T/S 参数的电动扬声器的等效图。

[0042] 图 2 以方框图示出本发明的方法的主要处理步骤。

[0043] 图 3 更准确地示出扩展的 Kalman 滤波器估计器的操作。

## 具体实施方式

[0044] 对扬声器的总响应的建模

[0045] (Thiele 和 Small 参数)

[0046] 我们首先参照图 1 披露各种参数和方程,它们表述了电动扬声器 HP 的响应,这些响应受发电机 G 的电激励作用并传递关于声负载 CH 的压力信号。

[0047] 左半部分概略表示扬声器的电气部分,对其施加可测的激励电压  $U_{mes}$ ,该激励电压  $U_{mes}$  来自产生电流  $i$  的放大器,该电流  $i$  也是可测的并经过扬声器线圈。第一比率变压器 BI 概略表示被施加至线圈的电气-机械力转换。最后,比率回转器 Sd 概略表示机械(扬声器隔膜的位移)-声压转换。

[0048] 该等效图的各个分量(电阻、电感和电容)对电气、机械(例如线圈/隔膜移动电枢的质量)或声(扬声器后音腔内的空气体积)现象进行建模。

[0049] 该系统受下列联系方程控制(对于在户外或安装在靠近后音腔中的扬声器):

$$[0050] \quad u(t) = R_e * i(t) + B1(x) * dx/dt + d(L_e(x(t)) * i(t)) / dt$$

$$[0051] \quad B1(x) * i(t) + dL_e(x(t)) / dx * i^2(t) = M_{ms} * d^2x/dt^2 + R_{eq} * dx/dt + K_{eq}(x) * x$$

[0052]  $U$  是被施加至扬声器端子的电压,

[0053]  $i$  是流过线圈的电流,

[0054]  $x$  是隔膜的位移,

[0055]  $R_e$  是系统的电阻,

[0056]  $M_{ms}$  是对系统的移动电枢的总质量建模的等效质量,

[0057]  $R_{eq}$  是对系统的摩擦和机械损失建模的等效电阻,

[0058]  $L_e$  是系统的电感,

[0059] BI 是驱动力因数(间隙中的磁场与线圈长度之积),以及

[0060]  $K_{eq}$  是对悬置物(三脚架、外部悬置物和音腔)的总刚度建模的等效刚度。

[0061] 前面三个参数( $R_e$ ,  $M_{ms}$  和  $R_{eq}$ )是线性参数,等效质量  $M_{ms}$  甚至是不变的,根据制造商的规范被假设为已知的。另一方面,在短时间内(其估计时间)可认为是常数的  $R_e$  和  $R_{eq}$  是容易因变于移动线圈的温度上升、组件的老化等逐渐地随时间漂移的参数,并且它们因此必须以规则间隔进行重新评价。

[0062] 后面三个参数( $L_e$ 、BI 和  $K_{eq}$ )是非线性参数,它们依赖于隔膜的位移  $x$  的瞬时值。它们可由多项式模型逼近:

$$[0063] \quad B1(x) = B1_0 + B1_1x + B1_2x^2$$

$$[0064] \quad K_{eq}(x) = K_{eq0} + K_{eq1}x + K_{eq2}x^2$$

$$[0065] \quad L_e(x) = L_{e0} + L_{e1}x + L_{e2}x^2 + L_{e3}x^3 + L_{e4}x^4$$

[0066] 模型的完全知晓因此需要确定线性参数  $R_e$  和  $R_{eq}$  以及确定非线性参数 BI、 $K_{eq}$  和  $L_e$  的多项式系数。

[0067] 这些参数的集合在下文中将被称为“状态矢量” $X$ ,其中  $X = [R_e, R_{eq}, B1_0, B1_1, B1_2, K_{eq0}, K_{eq1}, K_{eq2}, L_{e0}, L_{e1}, L_{e2}, L_{e3}, L_{e4}]^T$ 。

[0068] 位移  $x$ ,作为未被测量的参数,将是估计器的隐藏变量。

[0069] 前面的方程是在连续时间下写出的,如果希望切换至离散模式(对应于数字采样),则使用欧拉变换,其表示为:

[0070]  $u_n = R_e * i_n + L_e' (x_n) * v_n + i_n + L_e (x_n) * j_n + B_l (x_n) * v_n$  方程 (1)

[0071]  $B_l (x_n) * i_n + L_e' (x_n) * i_n^2 = M_{ms} * F_s * (v_{n+1} - v_n) + R_{eq} * v_n + K_{eq} (x_n) * x_n$

[0072] 方程 (2)

[0073] 其中,  $v_n = F_s * (x_{n+1} - x_n)$  代表隔膜的位移速度,  $F_s$  是采样频率而  $j_n = F_s * (i_{n+1} - i_n)$  是电流的导数。

[0074] 要注意, 该方程系也可被扩展至对安装有后音腔的扬声器的响应的估计, 该后音腔包括向外的通风口, 例如“贝司反射”型。第三方程应当被添加至模型:

[0075]  $x_{p_n} = 2 * x_{p_{n-1}} - x_{p_{n-2}} + (-F_s * (R_{boxm} + R_{pm}) * (x_{p_{n-1}} - x_{p_{n-2}}))$

[0076]  $- K_{boxm} * (x_{p_n} + x_n) - R_{boxm} * F_s * (x_{n+1} - x_n)) / (F_s^2 * M_{pm})$  方程 (3)

[0077] 其中  $x_p$  (这将是估计器的第二隐藏变量) 表示通气口中包含的空气质量位移, 而  $M_{pm}$ 、 $R_{boxm}$ 、 $K_{boxm}$  和  $R_{pm}$  是已知参数, 这依赖于通气口和后音腔的尺寸。

[0078] 将扩展的 Kalman 滤波器应用至对扬声器响应的估计

[0079] 参见图 2 和图 3, 我们现在将要描述本发明的方法, 该方法允许估计扬声器的多个参数以将适当的处理操作作用于音频信号, 它将后者的响应建模考虑在内。

[0080] 要注意, 尽管这些图被呈现为互连电路, 但多种功能基本是软件实现的, 这种表示不具有解说性特征。该软件可特别地实现在 DSP 类型的专用数字信号处理芯片中。

[0081] 具体来说, 将被描述的处理操作是在之前经数字化的信号上执行的, 该算法针对连续信号帧 (例如 1024 个采样的帧) 以采样频率重复执行。

[0082] 特别地, 本发明实现 Kalman 滤波, 更准确地说是扩展的 Kalman 滤波 (EKF), 其主线将在下文中进一步披露。

[0083] 扩展的 Kalman 滤波器的基本原理

[0084] 基于广泛知晓的算法的“Kalman 滤波器”是包括无限脉冲响应 (IIR) 滤波器的状态估计器, 该状态估计器基于描述系统性质的一组方程和基于一系列观察到的测量值来估计动态系统的状态。

[0085] 这种滤波器尤其允许确定“隐藏状态”, 该“隐藏状态”是不被观察到但对估计而言属必要的参数。

[0086] 在当前情形中:

[0087] - 动态系统是扬声器响应;

[0088] - 描述系统性质的方程是前面的方程 (1)、(2) 以及可能是 (3);

[0089] - 在滤波器输入处施加的观察测量值是被施加至扬声器端子的电压以及流过后者的线圈的电流; 以及

[0090] - 隐藏状态是瞬时偏移, 即隔膜相对于其平衡位置的物理位移, 它是用于估计扬声器响应的非线性参数的必要参数, 如前面披露的那样。

[0091] Kalman 滤波器工作在两个阶段, 相继是:

[0092] 1°) 在滤波器的每次重复时执行的预测阶段: 该阶段在于根据演进方程相对于之前的时刻预测当前时刻扬声器的响应; 以及

[0093] 2°) 调整阶段, 其在于使用当前测量值 (电压、电流) 校正预测: 然后调整并更新对响应的建模以将测量的具体系统误差考虑在内。

[0094] 将扩展的 Kalman 滤波器应用至扬声器响应的估计

[0095] 一般,如果采纳这种状态表征形式,则 Kalman 过程的第一方程是模型的“演进方程”:

$$[0096] \quad x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k$$

[0097]  $x_k$  是状态矢量,其代表在时刻  $k$  的状态,

[0098]  $F_k$  是跃迁矩阵(在滤波器设计时被定义),它确定状态  $k-1$  至新状态  $k$  的演进,

[0099]  $B_k$  是噪声矢量(由传感器产生的高斯噪声),

[0100]  $u_k$  是控制矢量(在滤波器输入处的参数),以及

[0101]  $w_k$  是表征在时刻  $k$  的噪声的状态。

[0102] 在当前情形下,状态矢量  $x_k$  是由扬声器模型的参数构成的矢量:

$$[0103] \quad x_k = [R_e, R_{eq}, B_{l0}, B_{l1}, B_{l2}, K_{eq0}, K_{eq1}, K_{eq2}, L_{e0}, L_{e1}, L_{e2}, L_{e3}, L_{e4}]^T$$

[0104] Kalman 过程的第二方程是“测量方程”:

$$[0105] \quad z_k = H_k x_k + v_k$$

[0106]  $z_k$  是在时刻  $k$  的观察矢量(电压和电流测量值),

[0107]  $H_k$  是在时刻  $k$  的测量矩阵,即将该状态联系于测量值的观察矩阵,这是在滤波器设计时确定的,以及

[0108]  $v_k$  是在时刻  $k$  的测量值的噪声矢量。

[0109] 第一步是在时刻  $k$  基于时刻  $k-1$  的状态预测模型,这通过下面方程给出:

$$[0110] \quad \text{估计状态的预测(先验)} \quad \hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k$$

$$[0111] \quad \text{预测协方差(先验)} \quad P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k$$

[0112] 第二步是通过以下方程系借助在时刻  $k$  的测量值的观察更新模型:

$$[0113] \quad \text{革新或测量值残余} \quad \tilde{y}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}$$

$$[0114] \quad \text{革新协方差} \quad S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k$$

$$[0115] \quad \text{最佳 Kalman 增益} \quad K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}$$

$$[0116] \quad \text{估计状态的更新(先验)} \quad \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k$$

$$[0117] \quad \text{协方差的更新(先验)} \quad P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$$

[0118] 在线性系统的情形下,Kalman 估计是在隐藏模型的最小平方的意义中最佳的。

[0119] 然而,在上文中已看到所使用的扬声器响应的动态模型不是线性模型,由此刚才披露的 Kalman 滤波器不适用于本发明。

[0120] 因为这个原因,所使用的方法将是“扩展的 Kalman 滤波”或 EKF 为名已知的方法。

[0121] 模型的演进方程和测量方程以下列形式出现:

$$[0122] \quad x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_k$$

$$[0123] \quad z_k = h(x_k) + v_k$$

[0124]  $f$  和  $h$  是非线性的但它们是可微分的函数。

[0125] 扩展的 Kalman 滤波在于:在协方差矩阵(预测矩阵和更新矩阵)的计算期间通过其偏导数逼近这些函数  $f$ 、 $h$ ,以局部地线性化该模型并在预测系统的每个点应用于此并更

新之前披露的 Kalman 滤波器的方程。这些方程系分别变为：

$$[0126] \quad \text{估计状态的预测 (先验)} \quad \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1})$$

$$[0127] \quad \text{预测协方差 (先验)} \quad \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k-1}^T +$$

[0128] 以及：

$$[0129] \quad \text{革新或测量值残余} \quad \tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{z}_k - h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})$$

$$[0130] \quad \text{革新协方差} \quad \mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k$$

$$[0131] \quad \text{近乎最佳 Kalman 增益} \quad \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{S}_k^{-1}$$

$$[0132] \quad \text{估计状态的更新 (先验)} \quad \hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{y}}_k$$

$$[0133] \quad \text{协方差的更新 (先验)} \quad \mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1}$$

[0134] 跃迁矩阵和观察矩阵是下列雅可比矩阵（偏导数矩阵）：

$$[0135] \quad \mathbf{F}_{k-1} = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}}$$

$$[0136] \quad \mathbf{H}_k = \left. \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}}$$

[0137] 扩展的 Kalman 滤波器至由扬声器再现的音频信号的处理的实践应用

[0138] 刚才描述的操作方法可如图 2 示意地示出那样实现。

[0139] 来自媒体播放器的数字化音频信号 E 在数 / 模转换（方框 12）和放大（方框 14）之后通过扬声器 10 声学地再现。

[0140] 扬声器 10 的响应由扩展的 Kalman 滤波器（方框 16 的估计器）通过使用在扬声器 10 上收集的信号 18 作为输入来模拟，这些信号包括由放大器 14 施加至扬声器端子的电压  $U_{mes}$  以及在扬声器的移动线圈中循环的电流  $i$ 。

[0141] 扩展的 Kalman 滤波器 16 的操作将更具体地参照图 3 予以说明，其中方框 20 概略表示基于扬声器响应的建模的 Kalman 滤波器的估计器，方框 22 表示测量方程的函数  $h$  而方框 24 表示估计的状态和测得状态之间的比较，这允许推导出误差信号以更新动态模型。

[0142] 拟被估计的模型参数在时刻  $n$  形成状态矢量  $X_n$ （模式的参数  $M_{ms}$  被假设为已知的和不变的）：

$$[0143] \quad X_n = [B1_0, K_{eq0}, Le_0, R_{eq}, R_e, B1_1, K_{eq1}, Le_1, B1_2, K_{eq2}, L_{e2}, L_{e3}, L_{e4}]^T$$

[0144] 据认为在估计所需的时间期间扬声器响应的模型是不变的。例如，如果信号中  $T=10$  秒的分数被用于估计，则假设模型为了落在演进噪声内而在该时间  $T$  保持不变。

[0145] 因此，状态的演进方程归结为：

$$[0146] \quad X_{n+1} = X_n$$

[0147] 在扬声器端子处的电压的测量构成观察矢量  $U_{mes_{n-1}}$  的仅有分量。将该测量值与估计的电压  $U_{est_n} = h(X_n)$  和测得的电流  $i$  进行比较，估计的电压是通过在时刻  $n$  的参数估计获得的：

[0148]  $Uest_n = R_e * i_n + L_e' (x_n) * v_n * i_n + L_e (x_n) * j_n + B1 (x_n) * v_n$

[0149]  $x_n$  在这里是位移的隐藏变量,它是藉由方程 (1) 和 (2) 递归地计算出的。

[0150] 算法然后计算函数  $h$  相对于矢量  $X$  的每个分量的导数:  $dh(X)/dB1_0, dh(X)/dK_{eq0}, \dots$ , 它对应于估计的电压相对于模型的每个参数的偏导数。

[0151] 如果这些参数中的一个被普遍地标示为  $p$ , 则相对于  $p$  推导出方程 (A) 表示为:

[0152]  $d(Uest_n)/dp = (L_e'' (x_n) v_n i_n + L_e' (x_n) j_n + B1' (x_n) v_n) * dx_n/dp$

[0153]  $+ (L_e' (x_n) i_n + B1 (x_n)) * dv_n/dp + dB1 (x_n, p)/dp * v_n$

[0154]  $+ dL_e (x_n, p)/dp * j_n + dL_e' (x_n, p)/dp * v_n * i_n$

[0155] 并相对于  $p$  推导出和重排方程 (2) 表示为:

[0156]  $d(v_n)/dp = (1 - T_s * R_{eq}/M_{ms}) * d(v_{n-1})/dp +$

[0157]  $T_s/M_{ms} * (L_e'' (x_{n-1}) * i_{n-1}^2 + B1' (x_{n-1}) * i_{n-1} - K_{eq}' (x_{n-1}) x_{n-1})$

[0158]  $- K_{eq} (x_{n-1}) * d(x_{n-1})/dp + T_s/M_{ms} * (dB1 (x_{n-1})/dp * i_{n-1}$

[0159]  $+ dL_e' (x_{n-1})/dp * i_{n-1}^2 - dK_{eq} (x_{n-1})/dp * x_{n-1} - dR_{eq} (x_{n-1})/dp * v_{n-1})$

[0160] 以及:

[0161]  $d(x_n)/dp = d(x_{n-1})/dp + T_s * d(v_{n-1})/dp$

[0162] 这些方程允许递归地计算雅可比矩阵 (其在当前情形下是一简单矢量):

[0163]  $H = [dUest/dB1_0, dUest/dK_{eq0}, \dots, dUest/dL_{e4}]$

[0164] 算法的各个步骤可简要表述如下:

[0165] 1) 系统的预测 (使用该模型和模型的噪声):

[0166]  $X_{n|n-1} = X_{n-1|n-1}$

[0167]  $P_{n|n-1} = P_{n-1|n-1} + Q_n$

[0168]  $Q_n$  是模型噪声的协方差矩阵。

[0169] 2) 系统的更新:

[0170]  $Uest_n = h(X_{n|n-1})$

[0171]  $Uerror_n = Umes_n - Uest_n$

[0172]  $H_n$  的计算  $= [dUest_n/dB1_0, dUest_n/dK_{eq0}, \dots, dUest_n/dL_{e4}]$

[0173]  $S_n = H_n P_{n|n-1} H_n^T + R_n$

[0174]  $S_n$  是更新的误差矩阵,

[0175]  $R_n$  是观察噪声的协方差矩阵,

[0176]  $K_n$  是与误差相乘的增益,

[0177]  $X_{n|n}$  是拟估计的状态矢量, 以及

[0178]  $P_{n|n}$  是协方差矩阵的更新 (表述噪声)。

[0179]  $K_n = P_{n|n-1} H_n^T S_n^{-1}$

[0180]  $X_{n|n} = X_{n|n-1} + K_n * Uerror_n$

[0181]  $P_{n|n} = (I - K_n H_n) P_{n|n-1}$

[0182] 在时刻  $n$  扬声器模型的参数的估计是通过状态矢量  $X_{n|n}$  给出的。

[0183] 由此获得的状态矢量  $X_{n|n}$  可用于多种用途。

[0184] 扬声器响应的知晓, 尤其是隔膜的偏移  $x$  (隐藏变量, 不被测量但借助扩展的 Kalman 滤波器而被估计) 可显著地充当限幅器级 26 (图 2) 的输入数据: 将偏移的瞬时值

$x$  与确定的阈值  $x_{\max}$  比较,超过该阈值  $x_{\max}$  则该偏移被认为过大,具有损坏扬声器、出现失真等的风险。如果超出该阈值,限幅器确定低于该单位的衰减增益,该衰减增益将被施加至入射信号  $E$  以减小其振幅,由此使偏移保持在允许的范围内。

[0185] 可被施加至音频信号的另一处理是对非线性的补偿(方框 28)。事实上,只要扬声器响应被建模,可预测该响应的非线性并通过施加至该信号的适当逆处理补偿这些非线性。该处理本身是已知的并因此在这里不更详细地予以描述。

[0186] 要注意,对非线性的补偿往往向在输出处获得的信号增加功率。因此需要在该级核实用于补偿非线性的信号不会超过隔膜的允许偏移极限——在相反的情形下,比该单位更低的总衰减增益将被施加至信号以使偏移保持在允许的范围。

[0187] 根据本发明的另一方面,扩展的 Kalman 估计器通过在该音频信号再现期间收集关于该扬声器的电气参数(电压、电流)而直接地基于由扬声器再现的当前音频信号在飞行中运行。

[0188] 事实上,对激励扬声器隔膜的信号不存在理论上的约束,由此可实现由扩展的 Kalman 滤波器进行估计的方法。

[0189] 该系统则可用于公众的高保真设备,对用户透明地运作:无要求后者再现特定类型的校准信号(白噪声、连续音调等),为使算法能估计扬声器的参数,当播放音乐时后者能够以连续方式工作。

[0190] 然而,为了最佳地估计 T/S 模型的线性和非线性参数,尤其是依赖于隔膜位移  $x$  的  $B1(x)$ 、 $K_{eq}(x)$  和  $L_e(x)$  参数,播放的信号使该隔膜位移足够以使估计是可达到的最好的是优选的。

[0191] 为了确定激励信号  $E$  是否可用来更新 Kalman 估计器,当播放音乐时,信号的最后  $T$  秒(典型地  $T=10$  秒)被永久地保持在缓冲器 30(图 2)的存储器内。

[0192] 隔膜的位移是通过将方程(1)、(2)应用于估计器来持久地计算的(方框 32),扬声器参数是固定的并对应于由 Kalman 滤波器运行的最后估计的结果。

[0193] 对每  $N$  个采样(典型地  $N = 24000$  个采样)计算该位移的均方根值  $x_{\text{rms}}(n)$ (方框 32),例如通过下面的公式:

$$[0194] \quad x_{\text{rms}}(n) = \sqrt{(x(n)^2 + x(n-1)^2 + \dots + x(n-N)^2) / N}$$

[0195] 如果在与时间  $T$  对应的数个连续时间期间该均方根值高于给定阈值  $x_{\text{threshold}}$ (方框 34),则认为所播放的信号的最后  $T$  秒是有效的并以这样一种方式激活 Kalman 滤波器的更新:即后者可使用信号的这些最后  $T$  秒来重新估计扬声器响应的参数。

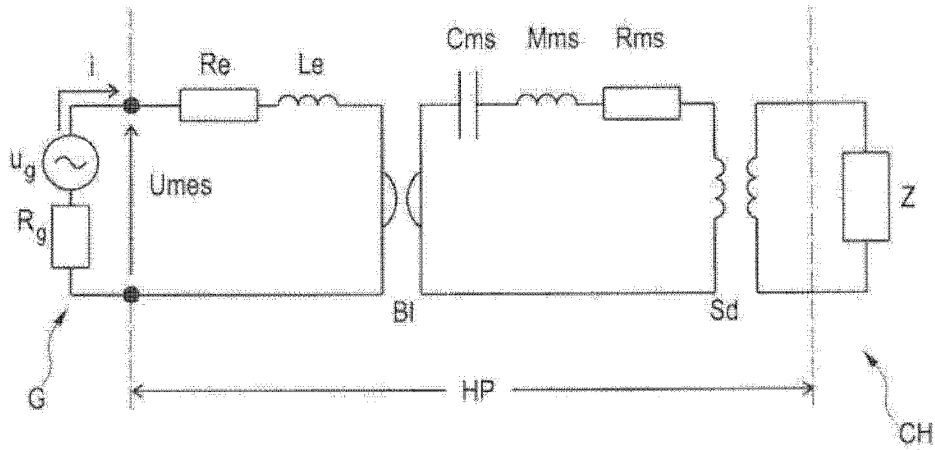


图 1

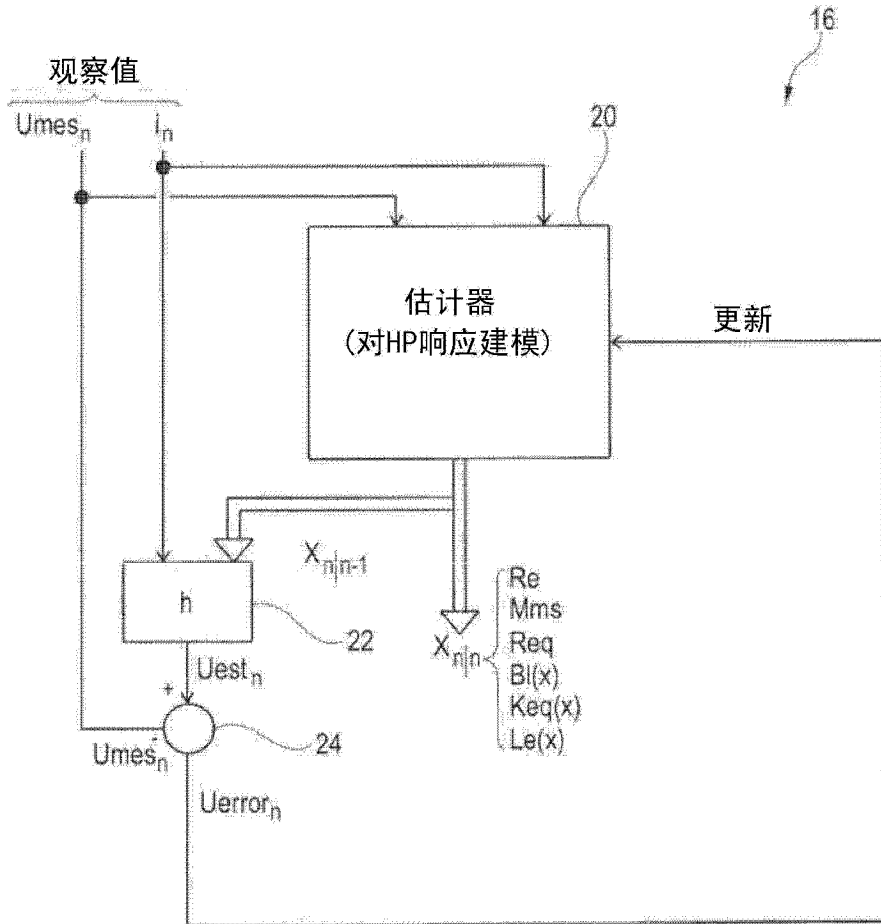


图 3

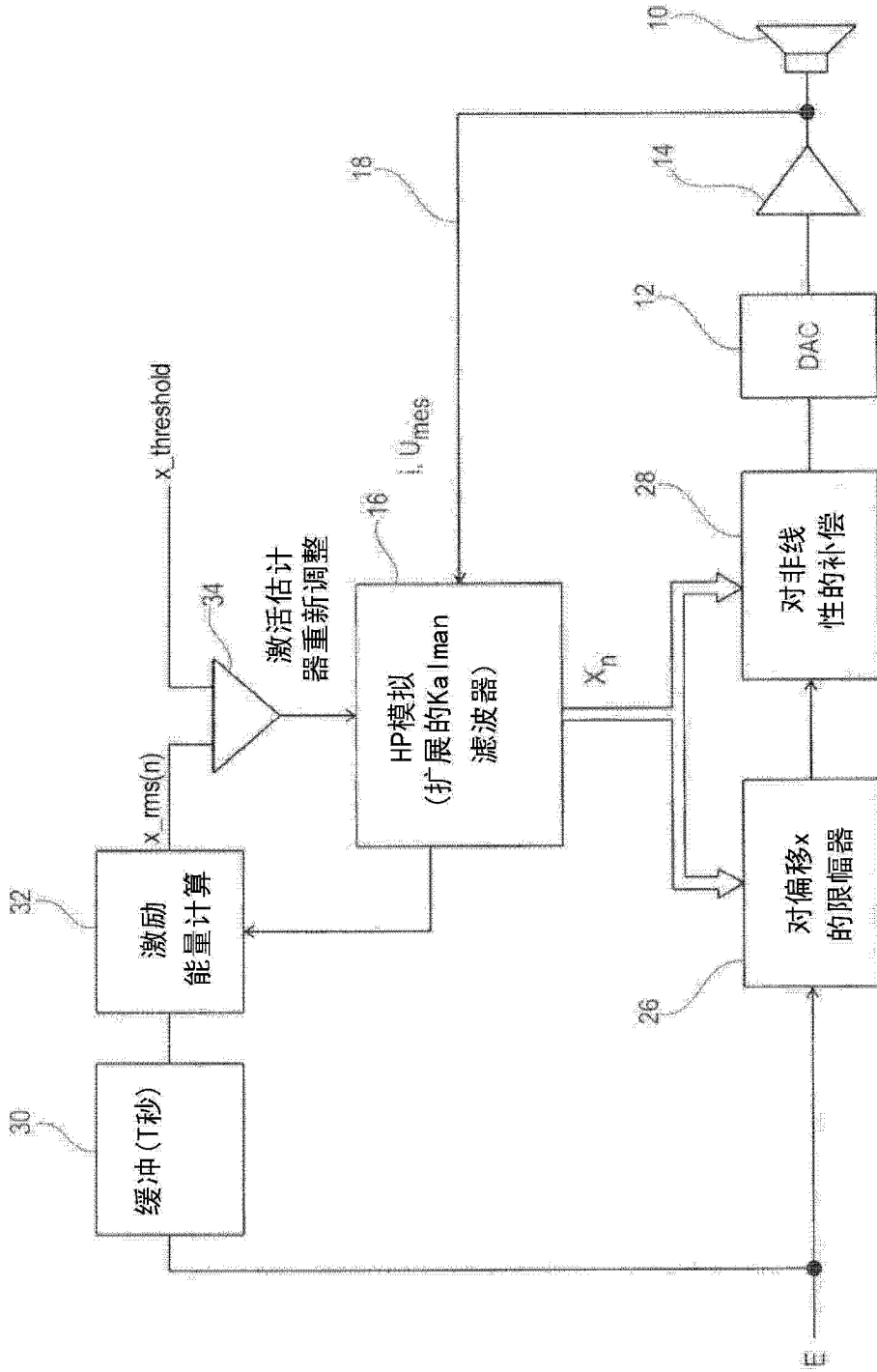


图 2