



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109410579 B

(45) 授权公告日 2021.07.06

(21) 申请号 201811338515.7

G08G 1/065 (2006.01)

(22) 申请日 2018.11.12

审查员 任倩

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109410579 A

(43) 申请公布日 2019.03.01

(73) 专利权人 广西交通科学研究院有限公司

地址 530000 广西壮族自治区南宁市西乡塘区高新二路6号

(72) 发明人 郑明德 徐韶华 黎恒 唐文娟 陈大华

(74) 专利代理机构 北京华仁联合知识产权代理有限公司 11588

代理人 苏雪雪

(51) Int. Cl.

G08G 1/01 (2006.01)

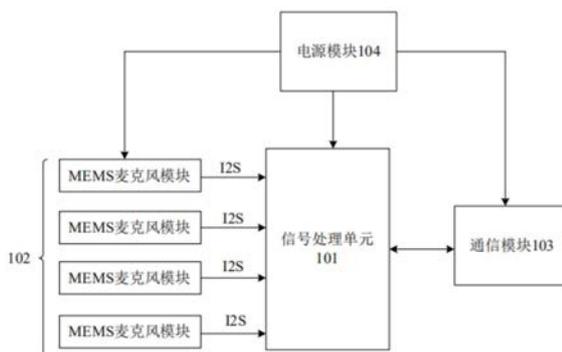
权利要求书2页 说明书11页 附图1页

(54) 发明名称

一种运动车辆音频检测系统及检测方法

(57) 摘要

本发明提供了一种运动车辆音频检测系统,所述系统包括阵列的多个MEMS麦克风模块,用于采集运动车辆的轮胎声音信号,并将采集的声音信号转换为数字信号;所述多个MEMS麦克风模块连接信号处理单元,所述信号处理单元接收多个MEMS麦克风模块的数字信号,并对数字信号进行处理,计算车辆的定位信息,其中,所述信号处理单元执行如下指令计算车辆的定位信息:所述信号处理单元连接通信模块,将计算得到的车辆定位信息通过所述通信模块输出。本发明安装维护方便、能够有效降低车辆定位过程环境因素的影响。



1. 一种运动车辆音频检测系统,其特征在于,所述系统包括阵列的多个MEMS麦克风模块,用于采集运动车辆的轮胎声音信号,并将采集的声音信号转换为数字信号;

所述多个MEMS麦克风模块连接信号处理单元,所述信号处理单元接收多个MEMS麦克风模块的数字信号,并对数字信号进行处理,计算车辆的定位信息,其中,所述信号处理单元执行如下指令计算车辆的定位信息:

a) 对每一个MEMS麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取;

b) 在轮胎噪声频段,通过波束形成扫描算法,对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计;在轮胎噪声频段,通过波束形成扫描算法,在时间 $t$ ,频率 $\omega$ 下,对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计包括如下方法步骤:

b1) 计算所有MEMS麦克风模块组成的阵列导向矢量 $d$ ,导向角 $\theta$ 的导向矢量 $d_\theta$ 为:

$$d_\theta = [e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_1)/c}, e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_2)/c}, \dots, e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_M)/c}]$$

其中, $r$ 为麦克风阵列的半径, $\varphi_n$ 为第 $n$ 个MEMS麦克风模块的方位角, $n=1,2,\dots,M$ , $M$ 为MEMS麦克风模块的个数, $c$ 为声音在空气中传播速度;

b2) 选定麦克风阵列方向图的指向角 $\rho_0$ 以及 $M-1$ 个陷零角 $\rho$ , $0 < \rho < 2\pi$ ,记为 $\rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{M-1}]$ ;

b3) 计算关于步骤b2)中指向角 $\rho_0$ 以及 $M-1$ 个陷零角形成矩阵 $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} d_{\rho_0} \\ d_{\rho_1} \\ \dots \\ d_{\rho_{M-1}} \end{bmatrix},$$

b4) 求解方程 $A^* h_{\rho_0} = c$ ,得到 $M$ 维滤波算子 $h_{\rho_0}$ ,其中 $c$ 为 $M$ 维列向量 $c = [1, 0, 0, \dots, 0]$ ;

b5) 在角度 $0 < \beta < 2\pi$ 范围进行波束形成: $B_{t,\beta} = h_\beta^H X_{t,\omega}$ ,

b6) 寻找最大的波束成形 $B_{t,\beta}$ ,在时间 $t$ ,频率 $\omega$ 对应的角度 $\beta$ 下,求解车辆方向 $\gamma_{t,\omega} = \arg \max_{\beta} B_{t,\beta}$ ,得到车辆定向估计;

c) 在车辆定向估计基础上,应用音频频谱稀疏性原理进行车辆数目估计,并得到一段时间内各车辆声音所占频段;

d) 在车辆数目估计基础上,应用SRP-PHAT算法进行车辆定位,得到车辆的定位信息;

所述信号处理单元连接通信模块,将计算得到的车辆定位信息通过所述通信模块输出。

2. 根据权利要求1所述的音频检测系统,其特征在于,所述步骤a)中,对每一个MEMS麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取包括如下方法步骤:

a1) 信号处理单元对接收得到的 $n$ 路数字信号 $x_n(t)$ 进行分帧,每帧长度为25ms,得到分帧处理后的信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ ;

a2) 对分帧处理后的信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 加汉明窗并进行快速傅里叶变换,得到频域信号 $X_1(\omega), X_2(\omega), \dots, X_n(\omega)$ ;

a3) 抽取频域信号属于轮胎噪声的频段,形成窄带轮胎噪声频域信号 $X_{t,k} = [X_1(k), X_2(k), \dots, X_n(k)]$ 。

3. 一种运动车辆音频检测方法,其特征在于,所述方法包括如下方法步骤:

a) 对每一个MEMS麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取;

b) 在轮胎噪声频段,通过波束形成扫描算法,对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计;在轮胎噪声频段,通过波束形成扫描算法,在时间 $t$ ,频率 $\omega$ 下,对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计包括如下方法步骤:

b1) 计算所有MEMS麦克风模块组成的阵列导向矢量 $d$ ,导向角 $\theta$ 的导向矢量 $d_\theta$ 为:

$$d_\theta = [e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_1)/c}, e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_2)/c}, \dots, e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_M)/c}]$$

其中, $r$ 为麦克风阵列的半径, $\varphi_n$ 为第 $n$ 个MEMS麦克风模块的方位角, $n=1,2,\dots,M$ , $M$ 为MEMS麦克风模块的个数, $c$ 为声音在空气中传播速度;

b2) 选定麦克风阵列方向图的指向角 $\rho_0$ 以及 $M-1$ 个陷零角 $\rho$ , $0 < \rho < 2\pi$ ,记为 $\rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{M-1}]$ ;

b3) 计算关于步骤b2)中指向角 $\rho_0$ 以及 $M-1$ 个陷零角形成矩阵 $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} d_{\rho_0} \\ d_{\rho_1} \\ \dots \\ d_{\rho_{M-1}} \end{bmatrix}$$

b4) 求解方程 $A^* h_{\rho_0} = c$ ,得到 $M$ 维滤波算子 $h_{\rho_0}$ ,其中 $c$ 为 $M$ 维列向量 $c = [1, 0, 0, \dots, 0]$ ;

b5) 在角度 $0 < \beta < 2\pi$ 范围进行波束形成: $B_{t,\beta} = h_\beta^H X_{t,\omega}$ ,

b6) 寻找最大的波束成形 $B_{t,\beta}$ ,在时间 $t$ ,频率 $\omega$ 对应的角度 $\beta$ 下,求解车辆方向 $\gamma_{t,\omega} = \arg \max_{\beta} B_{t,\beta}$ ,得到车辆定向估计;

c) 在车辆定向估计基础上,应用音频频谱稀疏性原理进行车辆数目估计,并得到一段时间内各车辆声音所占频段;

d) 在车辆数目估计基础上,应用SRP-PHAT算法进行车辆定位,得到车辆的定位信息。

4. 根据权利要求3所述的音频检测方法,其特征在于,所述步骤a)中,对每一个MEMS麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取包括如下方法步骤:

a1) 信号处理单元对接收得到的 $n$ 路数字信号 $x_n(t)$ 进行分帧,每帧长度为25ms,得到分帧处理后的信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ ;

a2) 对分帧处理后的信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 加汉明窗并进行快速傅里叶变换,得到频域信号 $X_1(\omega), X_2(\omega), \dots, X_n(\omega)$ ;

a3) 抽取频域信号属于轮胎噪声的频段,形成窄带轮胎噪声频域信号 $X_{t,k} = [X_1(k), X_2(k), \dots, X_n(k)]$ 。

## 一种运动车辆音频检测系统及检测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及定位检测技术领域,特别涉及一种运动车辆音频检测系统及检测方法。

### 背景技术

[0002] 随着公路建设发展迅速,公路交通已成为经济发展不可缺少的纽带。计算机及信息技术的飞速发展,交通控制也朝着智能化、信息化的方向发展。在智能交通的应用当中,最基本的部分是车辆信息的实时采集,这部分的关键在于车辆的检测技术。车辆检测技术作为智能交通的关键技术之一,无论是在交通诱导、交通信号控制、还是高速公路管理、电子收费等领域,都起着重要的作用。交通发展要求沿道路大量地设置车辆检测器,以便获取车辆的运行信息,而目前所使用的主流检测方法,由于种种原因,尚难以满足沿道路大量铺设的要求。目前进行车辆检测的技术包括地感线圈、摄像头、微波、红外等几类,分别简介如下:

#### [0003] (1) 地感线圈

[0004] 线圈车辆检测器出现于20世纪60年代,是目前交通控制中应用最广的交通量检测器。随着电子技术、控制理论及计算机技术的飞速发展,基于线圈的车辆检测器也在不断改进,这里给出一种基于环形线圈车辆检测系统的整体设计方案。环形线圈检测器是一种基于电磁感应原理的车辆检测器,它的传感器是一个埋设在路面下、通有一定交变电流的环形线圈。当车辆通过线圈或停在线圈上时,车辆引起线圈回路电感量的变化,检测器检测出该变化就可以检测出车辆的存在。

[0005] 地感线圈在一条车道上相距一定距离的地方埋设2个环形线圈,环形线圈的输出可以是方波或脉冲方式,只要让微处理器对输出信号的上升沿或下降沿进行计数,则两种方式均可来检测车辆。地磁感应线圈的方法需要切割路面,甚至封闭路段进行施工,安装维护困难,封路施工过程中会造成拥堵存在较大安全隐患。采用电磁感应检测技术是根据不同车辆通过埋设于道路下的环形感应线圈时,引起其电感量不同的变化来检测车辆的到达和离开,并进行车型分类。系统的关键部分为线圈探测器,它由感应线圈和控制部分组成。当没有车辆通过时,振荡器的频率为人,当有车辆以一定的速度接近并从其上通过时,线圈的电感参数发生变化,进而引起振荡器的振荡频率发生微弱变化,在车辆行驶过程中,由于车辆底盘形状是不同的,振荡频率将随之而发生变化。当车辆离开环形线圈后,振荡器的频率恢复,因此得到了随汽车通行的时刻而变化的值,设定一阈值,当频率变化值超过该阈值则认为有车辆经过。

[0006] (2) 车辆检测的另一种重要方法是通过摄像头装置,抓拍进入摄像头视线范围的车辆的进行识别。基于摄像头的车辆检测方法对光照有较高要求,要求抓拍到的车辆清晰可见。在夜间、浓雾等天气下,摄像头检测方法的识别精度大幅下降。

[0007] (3) 其它的检测方法如超声波检测方法、红外线检测方法等在车辆检测上都有不同程度的应用,虽然这些方法已经相当成熟,但由于这些方法不是对路段有破坏性,设备后

期维护要求高,就是不适合沿道路大量铺设。

[0008] 现有方法中,地感线圈方式安装维护均需要切割路面;基于摄像头的方案成本高、需要瞄点安装、在夜间、雾天、雨天的识别效果较低;基于超声波、红外线的方法检测精度不高、检测距离短,容易受雨雪等环境因素影响。

[0009] 因此,为解决现有车辆检测技术存在的安装维护困难、容易受环境因素影响的问题,需要一种运动车辆音频检测系统及检测方法。

## 发明内容

[0010] 本发明的一个方面在于提供一种运动车辆音频检测系统,所述系统包括阵列的多个MEMS麦克风模块,用于采集运动车辆的轮胎声音信号,并将采集的声音信号转换为数字信号;

[0011] 所述多个MEMS麦克风模块连接信号处理单元,所述信号处理单元接收多个MEMS麦克风模块的数字信号,并对数字信号进行处理,计算车辆的定位信息,其中,所述信号处理单元执行如下指令计算车辆的定位信息:

[0012] a) 对每一个MEMS麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取;

[0013] b) 在轮胎噪声频段,通过波束形成扫描算法,对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计;

[0014] c) 在车辆定向估计基础上,应用音频频谱稀疏性原理进行车辆数目估计,并得到该时间内各车辆声音所占频段;

[0015] d) 在车辆数目估计基础上,应用SRP-PHAT算法进行车辆定位,得到车辆的定位信息;

[0016] 所述信号处理单元连接通信模块,将计算得到的车辆定位信息通过所述通信模块输出。

[0017] 进一步地,所述步骤a)中,对每一个MEMS麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取包括如下方法步骤:

[0018] a1) 信号处理单元对接收得到的n路数字信号 $x_n(t)$ 进行分帧,每帧长度为25ms,得到分帧处理后的信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ ;

[0019] a2) 对分帧处理后的信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 加汉明窗并进行快速傅里叶变换,得到频域信号 $X_1(\omega), X_2(\omega), \dots, X_n(\omega)$ ;

[0020] a3) 抽取频域信号属于轮胎噪声的频段,形成窄带轮胎噪声频域信号 $X_{t,k} = [X_1(k), X_2(k), \dots, X_n(k)]$ 。

[0021] 进一步地,所述步骤b)中,在轮胎噪声频段,通过波束形成扫描算法,在时间t,频率 $\omega$ 下,对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计包括如下方法步骤:

[0022] b1) 计算所有MEMS麦克风模块组成的阵列导向矢量d,导向角 $\theta$ 的导向矢量 $d_\theta$ 为:

$$[0023] \quad d_\theta = [e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_1)/c}, e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_2)/c}, \dots, e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_M)/c}] ,$$

[0024] 其中,r为麦克风阵列的半径, $\varphi_n$ 为第n个MEMS麦克风模块的方位角, $n=1,2,\dots,M$ ,M为MEMS麦克风模块的个数,c为声音在空气中传播速度;

[0025] b2) 选定麦克风阵列方向图的指向角 $\rho_0$ 以及M-1个陷零角(0-2 $\pi$ ), 记为 $\rho = [\rho_1, \rho_1, \dots, \rho_{M-1}]$ ;

[0026] b3) 计算关于步骤b2) 中M-1个陷零角的导向矢量, 形成矩阵A:

$$[0027] \quad A = \begin{bmatrix} d_{\rho_0} \\ d_{\rho_1} \\ \dots \\ d_{\rho_{M-1}} \end{bmatrix},$$

[0028] b4) 求解方程 $A^* h_{\rho_0} = c$ , 得到M维滤波算子 $h_{\rho_0}$ , 其中c为M维列向量 $c = [1, 0, 0, \dots, 0]$ ;

[0029] b5) 在角度 $\beta \in (0-2\pi)$  范围进行波束形成:  $B_{t,\beta} = h_{\beta}^H X_{t,\omega}$ ,

[0030] b6) 寻找最大的波束成形 $B_{t,\beta}$  对应角度 $\beta$ 为在时间t, 频率 $\omega$ 下车辆方向:  $\gamma_{t,\omega} = \arg \max_{\beta} B_{t,\beta}$ , 得到车辆定向估计。

[0031] 进一步地, 所述步骤c) 中, 在车辆定向估计基础上, 应用音频频谱稀疏性原理进行车辆数目估计, 并得到该时间内各车辆声音所占频段, 包括如下方法步骤:

[0032] c1) 设定车辆定位数量上限N。

[0033] c2) 车辆定向估计得到在各频段下车辆方向的估计记为:  $\gamma_{t,\omega} = [\gamma_{t,\omega_1}, \gamma_{t,\omega_2}, \dots]$ 。

[0034] c3) 根据在各频段下车辆方向的估计记 $\gamma_{t,\omega} = [\gamma_{t,\omega_1}, \gamma_{t,\omega_2}, \dots]$ , 统计在时间t内各方向车辆出现的次数, 形成角度-车辆次数的统计图;

[0035] c4) 找到角度-车辆次数统计图中车辆次数的最大值 $q_{t,\max}$  和峰值  $q_{t,peak} = [q_{t,\max}, q_{t,peak1}, q_{t,peak2}, \dots, q_{t,peakN-1}]$ ;

[0036] c5) 保留 $q_{t,peak} = [q_{t,\max}, q_{t,peak1}, q_{t,peak2}, \dots, q_{t,peakN-1}]$  中 $q_{t,peak} > 0.7q_{t,peakn}$  的分量, 得到  $\hat{q}_{t,peak} = [q_{t,peak} | q_{t,peak} > 0.7q_{t,peakn}]$ , 其中,  $n=1, 2, 3, \dots, N-1$ ,

[0037]  $\hat{q}_{t,peak}$  的维度即在时间t出现的车辆数;

[0038] c6) 根据角度-车辆次数的统计图得到 $\hat{q}_{t,peak}$  的各维度在时间-频率谱中对应的频率集合, 输出每一维度(单一车辆声源) 在时间t对应的频谱频率集 $\omega_{t,veln}, n=1, 2, \dots$ , 得到时间t内各车辆声音所占频段。

[0039] 进一步地, 所述步骤d) 中, 在车辆数目估计基础上, 应用SRP-PHAT算法进行车辆定位, 得到车辆的定位信息包括如下方法步骤:

[0040] d1) 在时间t, 以及每一维度在时间t对应的频谱频率集 $\omega_{t,veln}$ , 和在各频段下车辆方向的估计 $\gamma_{t,\omega}$  情况下, 每一车辆对应一个t对应的频谱频率集 $\omega_{t,veln}, n=1, 2, \dots$ ;

[0041] 假设声源位置处于三维坐标(x, y, z) 记为 $\mathcal{P}$ ;

[0042] d2) 计算声源到第1个MEMS麦克风模块的直线传播的时延:

[0043]  $\tau(\mathcal{P}, l) = \frac{\|\mathcal{P} - m_l\|}{c}$ , 其中,  $m_l$  为第1个MEMS麦克风模块的坐标, c为声音在空气中传播

速度；

[0044] d3) 计算损失函数 $P(\hat{k})$

$$[0045] \quad P(\hat{k}) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=k+1}^M \int_{k \in \omega_{l,veln}} \psi_{kl}(k) X(k) X_l^*(k) e^{jk(\tau(\hat{k}, l) - \tau(\hat{k}, k))} dk,$$

[0046] 其中,  $\psi_{kl}(k)$  为第 $k$ 个MEMS麦克风模块和第 $l$ 个MEMS麦克风模块的相关系数, “\*”表示复共轭:

$$[0047] \quad \psi_{kl}(k) = \frac{1}{X_k(k) X_l^*(k)};$$

[0048] d4) 找出使损失函数 $P(\hat{k})$ 最大的声源估计 $\hat{k}$ , 将其作为该车辆位置 $x_s$ ,

$$x_s = \underset{\hat{k}}{\operatorname{argmax}} P(\hat{k}).$$

[0049] 本发明的另一个方面在于提供一种运动车辆音频检测方法, 所述方法包括如下方法步骤:

[0050] a) 对每一个MEMS麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取;

[0051] b) 在轮胎噪声频段, 通过波束形成扫描算法, 对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计;

[0052] c) 在车辆定向估计基础上, 应用音频频谱稀疏性原理进行车辆数目估计, 并得到该时间内各车辆声音所占频段;

[0053] d) 在车辆数目估计基础上, 应用SRP-PHAT算法进行车辆定位, 得到车辆的定位信息。

[0054] 进一步地, 所述步骤a) 中, 对每一个MEMS麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取包括如下方法步骤:

[0055] a1) 信号处理单元对接收得到的 $n$ 路数字信号 $x_n(t)$ 进行分帧, 每帧长度为25ms, 得到分帧处理后的信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ ;

[0056] a2) 对分帧处理后的信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 加汉明窗并进行快速傅里叶变换, 得到频域信号 $X_1(\omega), X_2(\omega), \dots, X_n(\omega)$ ;

[0057] a3) 抽取频域信号属于轮胎噪声的频段, 形成窄带轮胎噪声频域信号 $X_{t,k} = [X_1(k), X_2(k), \dots, X_n(k)]$ 。

[0058] 进一步地, 所述步骤b) 中, 在轮胎噪声频段, 通过波束形成扫描算法, 在时间 $t$ , 频率 $\omega$ 下, 对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计包括如下方法步骤:

[0059] b1) 计算所有MEMS麦克风模块组成的阵列导向矢量 $d$ , 导向角 $\theta$ 的导向矢量 $d_\theta$ 为:

$$[0060] \quad d_\theta = [e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_1)/c}, e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_2)/c}, \dots, e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_M)/c}],$$

[0061] 其中,  $r$ 为麦克风阵列的半径,  $\varphi_n$ 为第 $n$ 个MEMS麦克风模块的方位角,  $n=1, 2, \dots, M$ ,  $M$ 为MEMS麦克风模块的个数,  $c$ 为声音在空气中传播速度;

[0062] b2) 选定麦克风阵列方向图的指向角 $\rho_0$ 以及 $M-1$ 个陷零角 $(0-2\pi)$ , 记为 $\rho = [\rho_1, \rho_1, \dots, \rho_{M-1}]$ ;

[0063] b3) 计算关于步骤b2) 中 $M-1$ 个陷零角的导向矢量, 形成矩阵 $A$ :

$$[0064] \quad A = \begin{bmatrix} d_{\rho 0} \\ d_{\rho 1} \\ \dots \\ d_{\rho M-1} \end{bmatrix},$$

[0065] b4) 求解方程  $A^* h_{\rho 0} = c$ , 得到M维滤波算子  $h_{\rho 0}$ , 其中  $c$  为M维列向量  $c = [1, 0, 0, \dots, 0]$ ;

[0066] b5) 在角度  $\beta \in (0-2\pi)$  范围进行波束形成:  $B_{t,\beta} = h_{\beta}^H X_{t,\omega}$ ,

[0067] b6) 寻找最大的波束成形  $B_{t,\beta}$  对应角度  $\beta$  为在时间  $t$ , 频率  $\omega$  下车辆方向:  $\gamma_{t,\omega} = \arg \max_{\beta} B_{t,\beta}$ , 得到车辆定向估计。

[0068] 进一步地, 所述步骤c) 中, 在车辆定向估计基础上, 应用音频频谱稀疏性原理进行车辆数目估计, 并得到该时间内各车辆声音所占频段, 包括如下方法步骤:

[0069] c1) 设定车辆定位数量上限  $N$ 。

[0070] c2) 车辆定向估计得到在各频段下车辆方向的估计记为:  $\gamma_{t,\omega} = [\gamma_{t,\omega 1}, \gamma_{t,\omega 2}, \dots]$ 。

[0071] c3) 根据在各频段下车辆方向的估计记  $\gamma_{t,\omega} = [\gamma_{t,\omega 1}, \gamma_{t,\omega 2}, \dots]$ , 统计在时间  $t$  内各方向车辆出现的次数, 形成角度-车辆次数的统计图;

[0072] c4) 找到角度-车辆次数统计图中车辆次数的最大值  $q_{t, \max}$  和峰值  $q_{t, \text{peak}} = [q_{t, \max}, q_{t, \text{peak}1}, q_{t, \text{peak}2}, \dots, q_{t, \text{peak}N-1}]$ ;

[0073] c5) 保留  $q_{t, \text{peak}} = [q_{t, \max}, q_{t, \text{peak}1}, q_{t, \text{peak}2}, \dots, q_{t, \text{peak}N-1}]$  中  $q_{t, \text{peak}} > 0.7q_{t, \text{peak}n}$  的分量, 得到  $\hat{q}_{t, \text{peak}} = [q_{t, \text{peak}} | q_{t, \text{peak}} > 0.7q_{t, \text{peak}n}]$ , 其中,  $n = 1, 2, 3, \dots, N-1$ ,

[0074]  $\hat{q}_{t, \text{peak}}$  的维度即在时间  $t$  出现的车辆数;

[0075] c6) 根据角度-车辆次数的统计图得到  $\hat{q}_{t, \text{peak}}$  的各维度在时间-频率谱中对应的频率集合, 输出每一维度 (单一车辆声源) 在时间  $t$  对应的频谱频率集  $\omega_{t, \text{vel}n}, n = 1, 2, \dots$ , 得到时间  $t$  内各车辆声音所占频段。

[0076] 进一步地, 所述步骤d) 中, 在车辆数目估计基础上, 应用SRP-PHAT算法进行车辆定位, 得到车辆的定位信息包括如下方法步骤:

[0077] d1) 在时间  $t$ , 以及每一维度在时间  $t$  对应的频谱频率集  $\omega_{t, \text{vel}n}$ , 和在各频段下车辆方向的估计  $\gamma_{t,\omega}$  情况下, 每一车辆对应一个  $t$  对应的频谱频率集  $\omega_{t, \text{vel}n}, n = 1, 2, \dots$ ;

[0078] 假设声源位置处于三维坐标  $(x, y, z)$  记为  $\mathcal{K}$ ;

[0079] d2) 计算声源到第1个MEMS麦克风模块的直线传播的时延:

[0080]  $\tau(\mathcal{K}, l) = \frac{\|\mathcal{K} - m_l\|}{c}$ , 其中,  $m_l$  为第1个MEMS麦克风模块的坐标,  $c$  为声音在空气中传播

速度;

[0081] d3) 计算损失函数  $P(\mathcal{K})$

$$[0082] \quad P(\hat{x}) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=k+1}^M \int_{k \in \omega_{l,veln}} \psi_{kl}(k) X(k) X_l^*(k) e^{jk(\tau(\hat{x}, l) - \tau(\hat{x}, k))} dk,$$

[0083] 其中,  $\psi_{kl}(k)$  为第k个MEMS麦克风模块和第l个MEMS麦克风模块的相关系数, “\*”表示复共轭:

$$[0084] \quad \psi_{kl}(k) = \frac{1}{X_k(k) X_l^*(k)};$$

[0085] d4) 找出使损失函数  $P(\hat{x})$  最大的声源估计  $\hat{x}$ , 将其作为该车辆位置  $x_s$ ,

$$x_s = \underset{\hat{x}}{\operatorname{argmax}} P(\hat{x}).$$

[0086] 本发明提供了一种运动车辆音频检测系统及检测方法, 利用车辆运动的音频信号进行检测, 设备价格低、维护简单、能全天候工作, 可以进行大量铺设。

[0087] 本发明提供了一种运动车辆音频检测系统及检测方法, 音频车辆检测技术与其他视频、雷达等集成使用能够取得更好的检测效果。本发明以车辆行驶时产生的声音, 特别是车辆行驶过程中轮胎与地面摩擦产生的“轮胎噪声”为对象, 对车辆音频信号进行分析, 应用麦克风阵列信号处理技术实现车辆的定向、定位, 达到车辆检测的目的。

[0088] 本发明以音频为输入对象, 通过麦克风阵列信号处理技术实现音频车检, 与现有技术相比具有以下有益效果:

[0089] (1) 安装维护简单

[0090] 本发明接收汽车运动过程中轮胎和地面摩擦发出的声音, 可以安装在龙门架、路侧, 安装和维护过程只需简单地替换设备, 无需切割路面、复原路面等流程。

[0091] (2) 成本低廉

[0092] 音频传感器为麦克风, 相比摄像头、线圈等传感器成本更低。经数字化处理的音频信号频率低、一般为16kHz左右, 相对图像信号, 音频只需要简单廉价的处理器就能实现信号处理算法。

[0093] (3) 不需要瞄点安装

[0094] 摄像头、超声波、红外等方式检测存在方向性, 需要瞄准道路检测点/方向进行安装。音频方式接收范围广泛, 不需要瞄点安装, 只需安装在需要检测路段的侧方/上方。

[0095] (4) 不容易受环境因素影响

[0096] 相比摄像头、超声波、红外方法容易受天气影响。音频方式能在全天候正常工作, 即使传感器受到污染也能保障性能。

[0097] 应当理解, 前述大体的描述和后续详尽的描述均为示例性说明和解释, 并不应当用作对本发明所要求保护内容的限制。

## 附图说明

[0098] 参考随附的附图, 本发明更多的目的、功能和优点将通过本发明实施方式的如下描述得以阐明, 其中:

[0099] 图1是本发明运动车辆音频检测系统的结构框图。

[0100] 图2是本发明运动车辆音频检测方法的流程框图。

## 具体实施方式

[0101] 通过参考示范性实施例,本发明的目的和功能以及用于实现这些目的和功能的方法将得以阐明。然而,本发明并不受限于以下所公开的示范性实施例;可以通过不同形式来对其加以实现。说明书的实质仅仅是帮助相关领域技术人员综合理解本发明的具体细节。

[0102] 在下文中,将参考附图描述本发明的实施例。在附图中,相同的附图标记代表相同或类似的部件,或者相同或类似的步骤。下面通过具体的实施方式对本发明的内容进行说明,如图1所示本发明运动车辆音频检测系统的结构框图,一种运动车辆音频检测系统,包括阵列的多个MEMS麦克风模块,构成MEMS麦克风阵列102,用于采集运动车辆的轮胎声音信号,并将采集的声音信号转换为数字信号。

[0103] 多个MEMS麦克风模块连接信号处理单元101,信号处理单元101接收多个MEMS麦克风模块的数字信号,并对数字信号进行处理,计算车辆的定位信息。

[0104] 信号处理单元101连接通信模块103,将计算得到的车辆定位信息通过通信模块103输出。

[0105] 本发明的运动车辆音频检测系统还包括电源模块104,用于给MEMS麦克风阵列102、信号处理单元101和通信模块103供电。

[0106] 根据本发明的一个实施例,MEMS麦克风模块为敏芯MSM261S4030HOR数字麦克风,信号处理单元101为ST公司STM32F765ZG微处理器,通信模块103为基于max3232的UART控制芯片。在一些实施例中,信号处理单元101可以选用EP3C120F484C8N的FPGA。

[0107] 构成MEMS麦克风阵列102的MEMS麦克风模块位于空间的不同位置,在一些实施例中呈直线形,在另一些实施例中呈环形分布。每个MEMS麦克风模块通过I2S接口连接至信号处理单元101。本实施例中示例性的采用四个MEMS麦克风模块,在一些实施例中可以是多个,但至少是多于两个。

[0108] 根据本发明的实施例,MEMS麦克风阵列102采集汽车轮胎与路面摩擦的声音信号,发送至信号处理单元101进行信号处理,其中,信号处理单元101执行如下指令计算车辆的定位信息:

[0109] a) 对每一个MEMS麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取,包括如下方法步骤:

[0110] a1) 信号处理单元对接收得到的 $n$ 路数字信号 $x_n(t)$ 进行分帧,每帧长度为25ms,得到分帧处理后的信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 。

[0111] a2) 对分帧处理后的信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 加汉明窗并进行快速傅里叶变换,得到频域信号 $X_1(\omega), X_2(\omega), \dots, X_n(\omega)$ 。

[0112] a3) 抽取频域信号属于轮胎噪声的频段,形成窄带轮胎噪声频域信号 $X_{t,k} = [X_1(k), X_2(k), \dots, X_n(k)]$ 。

[0113] 上述实施例中对每一路MEMS麦克风模块的数字信号进行25ms分帧,提取的轮胎噪声为800至1500kHz,在一些实施例中,对每一路MEMS麦克风模块的数字信号进行20ms分帧,提取的轮胎噪声为1000至2000kHz。

[0114] b) 在轮胎噪声频段,通过波束形成扫描算法,对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计。

[0115] 本实施例,在轮胎噪声频段(800至1500kHz),通过波束形成扫描算法,在时间 $t$ ,频

率  $\omega$  下,对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计包括如下方法步骤:

[0116] b1) 计算所有MEMS麦克风模块组成的阵列导向矢量 $d$ ,导向角 $\theta$ 的导向矢量 $d_\theta$ 为:

$$[0117] \quad d_\theta = [e^{j\omega r \cos(\theta-\varphi_1)/c}, e^{j\omega r \cos(\theta-\varphi_2)/c}, \dots, e^{j\omega r \cos(\theta-\varphi_M)/c}],$$

[0118] 其中, $r$ 为麦克风阵列的半径, $\varphi_n$ 为第 $n$ 个MEMS麦克风模块的方位角, $n=1,2,\dots,M$ , $M$ 为MEMS麦克风模块的个数, $c$ 为声音在空气中传播速度。

[0119] b2) 选定麦克风阵列方向图的指向角 $\rho_0$ 以及 $M-1$ 个陷零角( $0-2\pi$ ),记为 $\rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{M-1}]$ 。

[0120] b3) 计算关于步骤b2)中 $M-1$ 个陷零角的导向矢量,形成矩阵 $A$ :

$$[0121] \quad A = \begin{bmatrix} d_{\rho_0} \\ d_{\rho_1} \\ \dots \\ d_{\rho_{M-1}} \end{bmatrix}。$$

[0122] b4) 求解方程 $A^* h_{\rho_0} = c$ ,得到 $M$ 维滤波算子 $h_{\rho_0}$ ,其中 $c$ 为 $M$ 维列向量 $c = [1, 0, 0, \dots, 0]$ 。

[0123] b5) 在角度 $\beta \in (0-2\pi)$ 范围进行波束形成: $B_{t,\beta} = h_{\rho_0}^H X_{t,\omega}$ 。

[0124] b6) 寻找最大的波束成形 $B_{t,\beta}$ 对应角度 $\beta$ 为在时间 $t$ ,频率 $\omega$ 下车辆方向:

$$\gamma_{t,\omega} = \arg \max_{\beta} B_{t,\beta}, \text{得到车辆定向估计。}$$

[0125] c) 在车辆定向估计基础上,应用音频频谱稀疏性原理进行车辆数目估计,并得到该时间内各车辆声音所占频段,包括如下方法步骤:

[0126] c1) 设定车辆定位数量上限 $N$ 。

[0127] c2) 车辆定向估计得到在各频段下车辆方向的估计记为: $\gamma_{t,\omega} = [\gamma_{t,\omega_1}, \gamma_{t,\omega_2}, \dots]$ 。

[0128] c3) 根据在各频段下车辆方向的估计记 $\gamma_{t,\omega} = [\gamma_{t,\omega_1}, \gamma_{t,\omega_2}, \dots]$ ,统计在时间 $t$ 内各方向车辆出现的次数,形成角度-车辆次数的统计图。

[0129] c4) 找到角度-车辆次数统计图中车辆次数的最大值 $q_{t,\max}$ 和峰值

$$q_{t,\text{peak}} = [q_{t,\max}, q_{t,\text{peak}1}, q_{t,\text{peak}2}, \dots, q_{t,\text{peak}N-1}]。$$

[0130] c5) 保留 $q_{t,\text{peak}} = [q_{t,\max}, q_{t,\text{peak}1}, q_{t,\text{peak}2}, \dots, q_{t,\text{peak}N-1}]$ 中 $q_{t,\text{peak}n} > 0.7q_{t,\text{peak}n}$ 的分量,得

$$\text{到 } \hat{q}_{t,\text{peak}} = [q_{t,\text{peak}n} | q_{t,\text{peak}n} > 0.7q_{t,\text{peak}n}], \text{其中, } n=1, 2, 3, \dots, N-1,$$

[0131]  $\hat{q}_{t,\text{peak}}$ 的维度即在时间 $t$ 出现的车辆数。

[0132] c6) 根据角度-车辆次数的统计图得到 $\hat{q}_{t,\text{peak}}$ 的各维度(即每辆车)在时间-频率谱中对应的频率集合,输出每一维度(单一车辆声源)在时间 $t$ 对应的频谱频率集 $\omega_{t,\text{vel}n}$ , $n=1, 2, \dots$ ,得到时间 $t$ 内各车辆声音所占频段。

[0133] d) 在车辆数目估计基础上,应用SRP-PHAT算法进行车辆定位,得到车辆的定位信息,包括如下方法步骤:

[0134] d1) 在时间 $t$ ,以及每一维度在时间 $t$ 对应的频谱频率集 $\omega_{t,\text{vel}n}$ ,和在各频段下车辆

方向的估计  $\gamma_{t,\omega}$  情况下,每一车辆对应一个  $t$  对应的频谱频率集  $\omega_{t,veln}, n=1,2,\dots$ ;

[0135] 假设声源位置处于三维坐标  $(x,y,z)$  记为  $\mathcal{P}$ ;

[0136] d2) 计算声源到第  $l$  个 MEMS 麦克风模块的直线传播的时延:

[0137]  $\tau(\mathcal{P}, l) = \frac{\|\mathcal{P} - m_l\|}{c}$ , 其中,  $m_l$  为第  $l$  个 MEMS 麦克风模块的坐标,  $c$  为声音在空气中传播速度;

[0138] d3) 计算损失函数  $P(\mathcal{P})$

$$[0139] \quad P(\mathcal{P}) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=k+1}^M \int_{k \in \omega_{t,veln}} \psi_{kl}(k) X(k) X_l^*(k) e^{jk(\tau(\mathcal{P}, l) - \tau(\mathcal{P}, k))} dk,$$

[0140] 其中,  $\psi_{kl}(k)$  为第  $k$  个 MEMS 麦克风模块和第  $l$  个 MEMS 麦克风模块的相关系数, “\*” 表示复共轭:

$$[0141] \quad \psi_{kl}(k) = \frac{1}{X_k(k) X_l^*(k)};$$

[0142] d4) 找出使损失函数  $P(\mathcal{P})$  最大的声源估计  $\mathcal{P}$ , 将其作为该车辆位置  $x_s$ ,

$$x_s = \underset{\mathcal{P}}{\operatorname{argmax}} P(\mathcal{P}).$$

[0143] 如图2所示本发明运动车辆音频检测方法的流程框图,根据本发明的实施例一种运动车辆音频检测方法,包括如下方法步骤:

[0144] 步骤S101、对每一个 MEMS 麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取。

[0145] 对每一个 MEMS 麦克风模块输入的数字信号进行预处理、时域-频域变换和轮胎噪声提取,包括如下方法步骤:

[0146] a1) 信号处理单元对接收得到的  $n$  路数字信号  $x_n(t)$  进行分帧,每帧长度为 25ms,得到分帧处理后的信号  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 。

[0147] a2) 对分帧处理后的信号  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$  加汉明窗并进行快速傅里叶变换,得到频域信号  $X_1(\omega), X_2(\omega), \dots, X_n(\omega)$ 。

[0148] a3) 抽取频域信号属于轮胎噪声的频段,形成窄带轮胎噪声频域信号  $X_{t,k} = [X_1(k), X_2(k), \dots, X_n(k)]$ 。

[0149] 上述实施例中对每一路 MEMS 麦克风模块的数字信号进行 25ms 分帧,提取的轮胎噪声为 800 至 1500kHz,在一些实施例中,对每一路 MEMS 麦克风模块的数字信号进行 20ms 分帧,提取的轮胎噪声为 1000 至 2000kHz。

[0150] 步骤S102、在轮胎噪声频段,通过波束形成扫描算法,对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计。

[0151] 本实施例,在轮胎噪声频段 (800 至 1500kHz),通过波束形成扫描算法,在时间  $t$ , 频率  $\omega$  下,对轮胎噪声所有频段进行车辆定向估计包括如下方法步骤:

[0152] b1) 计算所有 MEMS 麦克风模块组成的阵列导向矢量  $d$ , 导向角  $\theta$  的导向矢量  $d_\theta$  为:

$$[0153] \quad d_\theta = [e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_1)/c}, e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_2)/c}, \dots, e^{j\omega r \cos(\theta - \varphi_M)/c}],$$

[0154] 其中,  $r$  为麦克风阵列的半径,  $\varphi_n$  为第  $n$  个 MEMS 麦克风模块的方位角,  $n=1,2,\dots,M$ ,

M为MEMS麦克风模块的个数,c为声音在空气中传播速度。

[0155] b2) 选定麦克风阵列方向图的指向角 $\rho_0$ 以及M-1个陷零角(0-2 $\pi$ ),记为 $\rho = [\rho_1, \rho_1, \dots, \rho_{M-1}]$ 。

[0156] b3) 计算关于步骤b2)中M-1个陷零角的导向矢量,形成矩阵A:

$$[0157] \quad A = \begin{bmatrix} d_{\rho_0} \\ d_{\rho_1} \\ \dots \\ d_{\rho_{M-1}} \end{bmatrix} \circ$$

[0158] b4) 求解方程 $A^*h_{\rho_0} = c$ ,得到M维滤波算子 $h_{\rho_0}$ ,其中c为M维列向量 $c = [1, 0, 0, \dots, 0]$ 。

[0159] b5) 在角度 $\beta \in (0-2\pi)$ 范围进行波束形成: $B_{t,\beta} = h_{\beta}^H X_{t,\omega} \circ$

[0160] b6) 寻找最大的波束成形 $B_{t,\beta}$ 对应角度 $\beta$ 为在时间t,频率 $\omega$ 下车辆方向:  
 $\gamma_{t,\omega} = \arg \max_{\beta} B_{t,\beta}$ ,得到车辆定向估计。

[0161] 步骤S103、在车辆定向估计基础上,应用音频频谱稀疏性原理进行车辆数目估计,并得到该时间内各车辆声音所占频段。

[0162] 在车辆定向估计基础上,应用音频频谱稀疏性原理进行车辆数目估计,并得到该时间内各车辆声音所占频段,包括如下方法步骤:

[0163] c1) 设定车辆定位数量上限N。

[0164] c2) 车辆定向估计得到在各频段下车辆方向的估计记为: $\gamma_{t,\omega} = [\gamma_{t,\omega_1}, \gamma_{t,\omega_2}, \dots]$ 。

[0165] c3) 根据在各频段下车辆方向的估计记 $\gamma_{t,\omega} = [\gamma_{t,\omega_1}, \gamma_{t,\omega_2}, \dots]$ ,统计在时间t内各方向车辆出现的次数,形成角度-车辆次数的统计图。

[0166] c4) 找到角度-车辆次数统计图中车辆次数的最大值 $q_{t,max}$ 和峰值 $q_{t,peak} = [q_{t,max}, q_{t,peak1}, q_{t,peak2}, \dots, q_{t,peakN-1}]$ 。

[0167] c5) 保留 $q_{t,peak} = [q_{t,max}, q_{t,peak1}, q_{t,peak2}, \dots, q_{t,peakN-1}]$ 中 $q_{t,peak} > 0.7q_{t,peakn}$ 的分量,得到 $\hat{q}_{t,peak} = [q_{t,peak} | q_{t,peak} > 0.7q_{t,peakn}]$ ,其中, $n=1, 2, 3, \dots, N-1$ ,

[0168]  $\hat{q}_{t,peak}$ 的维度即在时间t出现的车辆数。

[0169] c6) 根据角度-车辆次数的统计图得到 $\hat{q}_{t,peak}$ 的各维度(即每辆车)在时间-频率谱中对应的频率集合,输出每一维度(单一车辆声源)在时间t对应的频谱频率集 $\omega_{t,veln}, n=1, 2, \dots$ ,得到时间t内各车辆声音所占频段。

[0170] 步骤S104、在车辆数目估计基础上,应用SRP-PHAT算法进行车辆定位,得到车辆的定位信息。

[0171] 在车辆数目估计基础上,应用SRP-PHAT算法进行车辆定位,得到车辆的定位信息,包括如下方法步骤:

[0172] d1) 在时间t,以及每一维度在时间t对应的频谱频率集 $\omega_{t,veln}$ ,和在各频段下车辆方向的估计 $\gamma_{t,\omega}$ 情况下,每一车辆对应一个t对应的频谱频率集 $\omega_{t,veln}, n=1, 2, \dots$ ;

[0173] 假设声源位置处于三维坐标  $(x, y, z)$  记为  $\mathcal{P}$ ;

[0174] d2) 计算声源到第1个MEMS麦克风模块的直线传播的时延:

[0175]  $\tau(\mathcal{P}, l) = \frac{\|\mathcal{P} - m_l\|}{c}$ , 其中,  $m_1$  为第1个MEMS麦克风模块的坐标,  $c$  为声音在空气中传播速度;

[0176] d3) 计算损失函数  $P(\mathcal{P})$

[0177] 
$$P(\mathcal{P}) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=k+1}^M \int_{k \in \omega_l, \text{vel } n} \psi_{kl}(k) X(k) X_l^*(k) e^{jk(\tau(\mathcal{P}, l) - \tau(\mathcal{P}, k))} dk,$$

[0178] 其中,  $\psi_{kl}(k)$  为第  $k$  个MEMS麦克风模块和第  $l$  个MEMS麦克风模块的相关系数, “\*” 表示复共轭:

[0179] 
$$\psi_{kl}(k) = \frac{1}{X_k(k) X_l^*(k)};$$

[0180] d4) 找出使损失函数  $P(\mathcal{P})$  最大的声源估计  $\mathcal{P}$ , 将其作为该车辆位置  $x_s$ ,

$$x_s = \underset{\mathcal{P}}{\operatorname{argmax}} P(\mathcal{P}).$$

[0181] 本发明以车辆行驶时产生的声音, 特别是车辆行驶过程中轮胎与地面摩擦产生的“轮胎噪声”为对象, 对车辆音频信号进行分析, 应用麦克风阵列信号处理技术实现车辆的定向、定位, 达到车辆检测的目的, 本发明利用车辆运动的音频信号进行检测, 设备价格低、维护简单、能全天候工作, 可以进行大量铺设, 音频车辆检测技术与其他视频、雷达等集成使用能够取得更好的检测效果。

[0182] 结合这里披露的本发明的说明和实践, 本发明的其他实施例对于本领域技术人员都是易于想到和理解的。说明和实施例仅被认为是示例性的, 本发明的真正范围和主旨均由权利要求所限定。

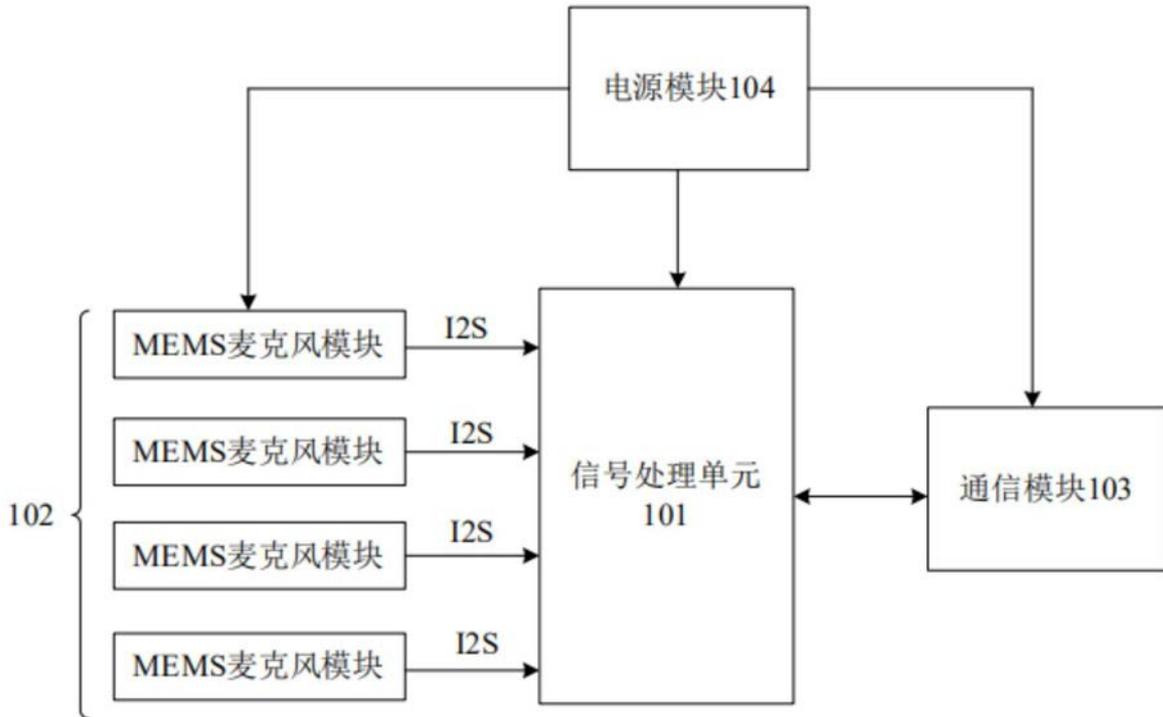


图1

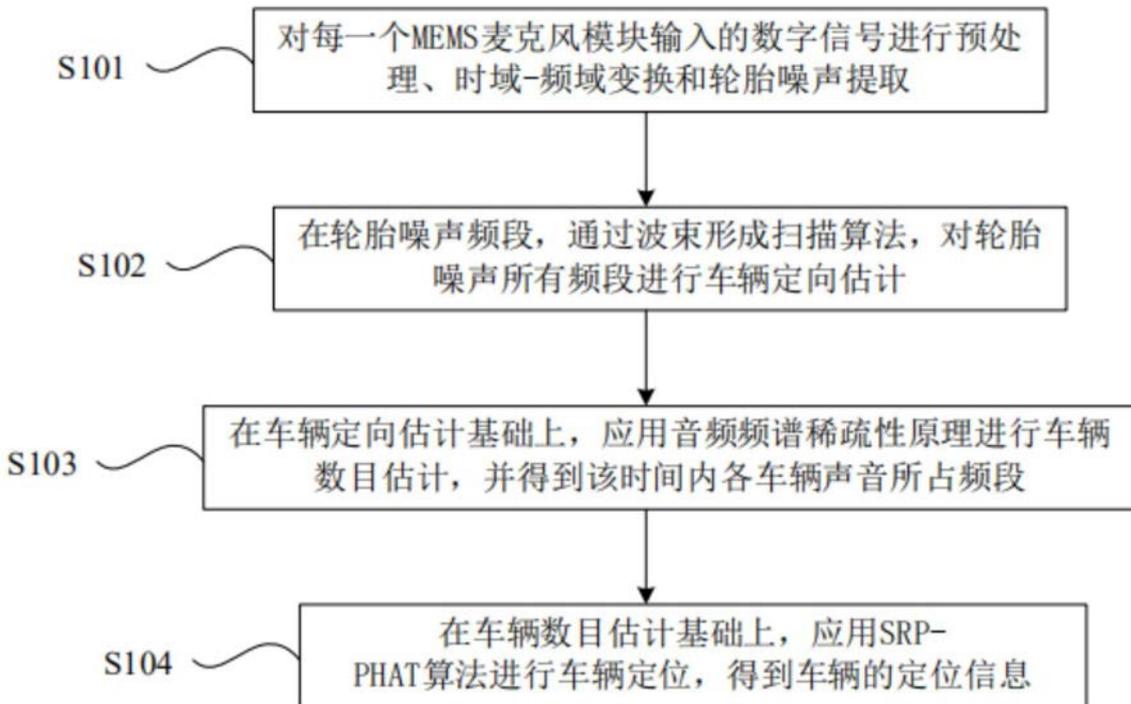


图2