DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.08.027

基于到达时差的低功耗声音定位系统*

王 益 平,王 皓,吴 衡,邬 杨 波* (宁波大学 信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211)

摘要:针对弱噪声环境中声音定位系统能耗大、精度低的问题,将低功耗模式下的基于到达时差(TDOA)的技术应用到声音定位 中。开展了在具体模拟应用中对基于到达时差的声音定位技术的数学建模与理论方法的分析,建立了声源信号在传送、接收和检测 3个方面的关系,提出了"由C8051F330单片机产生一路占空比为10%的窄脉宽信号,经拾音器接收、滤波、放大和整形处理,触发后 级FPGA做脉宽计数,周期性地向C8051F020单片机传递数据"的方法;为进一步提高系统的定位精度,采用了滑动平均滤波器的思 想和丢弃算法,有选择性地采集数据,降低了外界无效信号的干扰。在理论分析和试验的基础上,主要对移动声源功耗、系统定位精 度及声源路径跟踪功能3个方面作出了评价,进行了持续1s式或不间断式声音定位模式下的试验。研究结果表明,移动声源发声 功率为50.1 mW,声音定位最大误差2.6 cm,具有低功耗、稳定性好、精度高的特点,并可实时显示移动声源的行径轨迹。 关键词:声音定位;低功耗;到达时差;单片机;现场可编程门阵列

中图分类号: TP368.1 文献标志码: A

文章编号:1001-4551(2013)08-1015-05

Sound localization system based on time difference of arrival with considerable power saving

WANG Yi-ping, WANG Hao, WU Heng, WU Yang-bo

(Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Aiming at the high power dissipation and low precision problems of the localization of a moving sound source in the weak noise environment, a technology based on time difference of arrival (TDOA) was applied to locate the moving sound source, which had considerable power saving. After the analysis of mathematical modeling and theoretical means of the TDOA method in an analog application, the corresponding relationship between the delivering, receiving and identification of the sound source was established. A method was presented that a path of narrow pulse with a constant duty cycle produced by C8051F330 SCM was changed into a series of cyclical data through FPGA counted the effective width of the source signal, which was processed by a set of pickup devices, then it was transported to the core processor named C8051F020 SCM. To raise the precision of the system, the method of moving–average filter and throwing algorithm was utilized by the SCM so that it was able to lower parts of valid signals outside. Based on theoretically calculation and experiment, three aspects of the following were evaluated, including the power dissipation of the moving sound source, the accuracy of the system and the function of showing tracks. And two models of the setting were tested, which had differences in the time of the localization. The results indicate that, the power dissipation of the moving sound source is 50.1 mW and the maximum error of this system can reach 2.6 cm with the advantage of considerable power saving, excellent stability and high precision, and the tracks of the moving sound source can be shown timely through LCD.

Key words: sound signals localization; considerable power saving; time difference of arrival(TDOA); single chip microcomputer(SCM); field programmable gate array(FPGA)

收稿日期: 2013-03-05

基金项目:浙江省重中之重学科资助项目(010-C01898124200)

作者简介: 王益平(1990-),男,浙江宁波人,主要从事通信无线电方面的研究. E-mail;wangyiping_nbu@163.com 通信联系人: 邬杨波,男,副教授,硕士生导师. E-mail;wuyangbo@nbu.edu.cn

0 引 言

随着社会生产技术水平的提高和人们生活质量 的改善,声音定位技术的应用领域日益广泛,如货运 机器人目标定位、水下目标探测、航天舱体落点测量、 家居智能声控、安全监控等诸多领域^[1-5],呈现出广阔 的发展前景。

准确快速地判断移动声源的坐标位置是声音定 位技术的核心目标。目前,业界以麦克风阵列声源定 位技术为主流技术,它是一种利用麦克风拾取阵列拾 取语音信号并利用数字信号处理技术的声音定位方 法,具有良好的空间选择特性[6-7]。基于该原理,衍生 了以下3类技术:①基于高分辨率谱估计的定向技 术。它是通过求解麦克风信号间的相关矩阵确定声 源方向角的方法,进一步求解声源位置。该方法源于 高分辨率谱估计技术,如最小方差谱估计法和特征值 分解法等。它要求声源信号具有平稳性,并且,为了 降低外界干扰因素的影响和满足该技术应用的特殊 条件,需成倍地提高系统的运算量,由此对系统的硬件 设备提出了更高的要求。②基于最大输出功率的可控 波束形成技术。该技术通过对麦克风阵列接收到的语 音信号进行处理,直接控制麦克风指向声源信号最大 功率波束的方向。其中,最大似然估计是可控波束形 成技术的中心思想,要求声源和环境噪声的先验知 识,这点给系统的设计提出了较高的要求;③基于到 达时差(time difference of arrival, TDOA)的声源定位 技术[8]。该方法是一种无线定位技术,它通过测量移 动声源发出的声源信号到达各拾音器的时间差的方 法,实现定位功能。能否精确而灵活地估计延时长度 是影响声源定位的关键因素。相比谱估计法和可控 波束法,TDOA算法在运算量方面有明显的优势,以简 便的方法提高系统的实时性。

综合考虑系统设计和硬件设备的复杂程度与声 源定位的实时性,本研究介绍的系统采用到达时差的 方法,设置移动声源和拾音器接收、处理两个部分,分 别采用C8051F330单片机和C8051F020单片机作为控 制器。该系统中的声源信号经带通滤波、放大整形处 理,以有效降低外界噪声的干扰;而后,控制核心 C8051F020单片机根据FPGA 4路信道中信息的传送 顺序,判断声源所在区域,精确显示声源坐标。

1 基于TDOA算法数学模型

1.1 基于TDOA 算法的声音定位模拟平台

在某一水平面上,本研究指定一块确定的区域, 并在四角分别安装一路拾音器,同时无线接收由功耗 低于 200 mW 的移动声源发出的声源信号,交由后级 FPGA 脉宽计数电路和坐标识别核心处理器对声源信 号进行识别、处理,并判定移动声源坐标位置。声音 定位模拟平台如图1所示。



1.2 TDOA 数学模型

该系统采用TDOA算法,由4路拾音器接收移动 声源的信号,根据接收信号的时间差,利用滑动平均 滤波器思想和丢弃算法^[9],准确判断移动声源区域及 其坐标。以下是TDOA数学模型的原理介绍:

声音定位原理图如图2所示,根据图2,本研究设置50.0 cm×35.0 cm的声音定位区域,分别放置4路拾音器A、B、C、D,以S为移动声源,可持续1s或不间断式地向外界发送声源信号。其中,不失一般性地假设拾音器A为参考原点,分列I、II、III和IV4个区块。



图2 声音定位原理图

一般而言,TDOA算法是根据多路拾音器间接收 信号的时间差来准确定位移动声源的位置,降低了时 间的同步要求。

当4路拾音器接收到声源信号,将信息传递给后级FPGA脉宽计数电路。在其计数的有效时间内,FP-GA对4路脉宽信号作计数处理,计数值分别为 N_1 , N_2 , N_3 , N_4 ,而后交由C8051F020单片机作坐标识别处理。其中,最先接收到的一路信号作为触发信号,该路计数N值必为0,并以此判定移动声源的所在区域,分类计算,从而得到(x,y)的坐标值。通过计算,可代入不同模式下的坐标公式,降低单片机运行负荷,

且具有较高的坐标精度。

设声音传播速度 v = 340 m/s, FPGA 计数频率 f = 5 MHz, 有: $a = N_1 \times 0.068$, $b = N_2 \times 0.068$, $c = N_3 \times 0.068$, $d = N_4 \times 0.068$ 。

根据几何关系,理论上分区域推出如下公式:

$$\begin{cases} x = 250 - \frac{b^2}{1\ 200} - \frac{b(c^2 - b^2 - d^2)}{1\ 200(b + d - c)} \\ y = 175 - \frac{d^2}{900} - \frac{d(c^2 - b^2 - d^2)}{900(b + d - c)} \end{cases}$$

II \boxtimes :
$$\begin{cases} x = 250 + \frac{a^2}{1\ 200} + \frac{a(d^2 - c^2 - a^2)}{1\ 200(a + c - d)} \\ y = 175 - \frac{c^2}{900} - \frac{c(d^2 - c^2 - a^2)}{900(a + c - d)} \end{cases}$$

III \boxtimes :
$$\begin{cases} x = 250 + \frac{d^2}{1\ 200} + \frac{d(b^2 + d^2 - a^2)}{1\ 200(a - b - d)} \\ y = 175 + \frac{b^2}{900} + \frac{b(b^2 + d^2 - a^2)}{1\ 200(a - b - d)} \end{cases}$$

IV \boxtimes :
$$\begin{cases} x = 250 - \frac{c^2}{1\ 200} - \frac{c(a^2 + c^2 - b^2)}{1\ 200(a + c - b)} \\ y = 175 + \frac{a^2}{900} + \frac{a(a^2 + c^2 - b^2)}{1\ 200(a + c - b)} \end{cases}$$

2 系统硬件设计

声音定位系统硬件设计包括移动声源硬件电路 和拾音器接收、处理硬件电路两个主要部分,系统硬 件整体设计^[10]如图3所示。其中,移动声源硬件电路 包括产生窄脉宽的C8051F330单片机和声源信号驱 动外扩电路。拾音器接收、处理硬件电路包含4路声 音接收放大电路、FPGA脉宽计数电路和以C8051F020 单片机为核心的数据处理及显示部分。其中,声音接 收放大电路包含带通滤波器、放大电路、整形电路3个 部分,以有效提高信噪比,降低外界干扰。



2.2 声音接收放大电路设计

(1)

界发送声源信号。

系统实际工作环境中存在未知的干扰信号。麦 克风接收信号后,经过 $f_{\rm h}$ =1.2 kHz 的高通滤波器电 路,降低噪声的干扰,经过一级放大电路,放大被衰减 的有效信号。而后,经过 $f_{\rm H}$ =7.5 kHz 的低通滤波器, 并做放大整型处理,提取出有效成分。即输入回路的 外界信号经带通滤波、两级放大和整型电路,有效提 取声源信号,降低环境干扰。

由C8051F330单片机产生占空比等效为10%的

500 Hz 矩形音频信号, 可按键选择工作模式(持续1s

或不间断式发声),经三极管驱动放大外扩声源信

号。考虑移动声源功耗要求与拾音器接收强度,本研

究选取8Ω/0.25W额定功率的喇叭为外扩功放,向外

2.2.1 带通滤波器电路设计

2.1 移动声源硬件电路设计

利用微软滤波器设计软件和 Multisim 仿真软件,结合测试效果,取值:

 $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$, $C_2 = 0.1 \mu\text{F}$ (低 通);

 $R_8 = 6 \text{ k}\Omega, R_9 = 22 \text{ k}\Omega, C_3 = 4.7 \text{ nF}, C_4 = 1.0 \text{ nF}(高通)_{\odot}$

2.2.2 放大电路设计

采用反相放大电路,一级放大倍数为10倍,二级 放大倍数为20倍,放大倍数计算公式如下:

$$U_f = -\frac{R_f}{R}u_i \tag{2}$$

2.2.3 整形电路设计

整形电路部分实现同相输入单限比较功能,前级信号从同相端输入,经电压比较后,传送至后级 FPGA。其中, R_{13} =10 k Ω , R_{14} =10 k Ω 。

2.3 FPGA脉宽计数电路设计

初始时,由FPGA等待声源信号的到来。若有某 一信道开始接收有效的声源信号,FPGA即以该时间 点为基准,计算处理剩余3个信道与时间基准点的时 间差。

该硬件系统的计数频率为5 MHz,数据采集周期 *T* =2 ms。系统单次采集数据完毕,即向C8051F020单 片机发送4个信道的脉宽计数值 *N*,如此周而复始地 计数、传递数据。为避免外界无效信号的干扰,本研 究特设置去抖操作,以提高数据接收的可靠性。

3 系统软件设计

软件设计流程图如图4所示,C8051F020单片机 等待接收FPGA传递的4路信道计数值 N。它作为坐



标识别的核心处理器,根据 N 值判断声源信号所在区域,同时借鉴滑动平均滤波器思想和丢弃算法,对采 集的点做平均处理,丢弃离散值较大的点,有效降低 外界干扰,并实时更新数据。此外,通过按键切换,系 统可分别显示4路信道的脉宽计数值、各路拾音器的 麦克风与声源信号的距离及声源坐标值,LCD实时显 示移动声源的行径轨迹。

4 系统测试及结果分析

4.1 测试仪器

测试仪器包括:500 mm×350 mm坐标纸、毫米尺、 1.5 V五号电池、128 cm×64 cm液晶屏、LPS-305数控 式线性直流稳压电源、UT3数字万用表、GDS-2064数 字存储示波器。

4.2 数据测试

4.2.1 声响模块功耗测试

经测试,声源信号占空比10%,频率 *f* =497 Hz, 移动声源输入端 *U* =2.86 V, *I* =17.5 mA, *P* = *U* × *I* = 50.1 mW。

4.2.2 持续1 s式声音定位测试

经预处理,C8051F020单片机将获取的移动声源 坐标值作比例换算后,相应地显示在128 cm×64 cm液 晶屏上。设移动声源的水平坐标为(x,y),根据实际需 要,选取92 cm×64 cm的液晶屏显示区域,其对应坐标 为(x',y'),由此有:

$$\begin{cases} x' = int(x \times 92/50) \\ y' = int(y \times 64/35) \end{cases}$$
(3)

持续1s式声源定位实测数据如表1所示。

表1	持续1	s式声源定位实测数据表

理论值/cm	实测值/cm	误差/cm
(30.0,10.0)	(30.3,10.1)	(0.3,0.1)
(40.0,10.0)	(38.2,12.3)	(-1.8,1.7)
(45.0, 15.0)	(46.9,13.4)	(1.9,-1.6)
(20.0,30.0)	(20.1,28.4)	(0.1,-1.6)
(10.0,25.0)	(10.8,24.3)	(0.8,-0.7)

持续1s式液晶屏实测数据如表2所示。 表2 持续1s式液晶屏实测数据表

理论值/cm	实测值/cm	误差/cm	
(55.2,18.3)	(55,18)	(-0.2,-0.3)	
(73.6,18.3)	(70,22)	(-3.0,3.7)	
(82.8,27.4)	(86,24)	(3.2, -3.4)	
(36.8,54.9)	(37,51)	(0.2, -3.9)	
(18.4,45.7)	(19,44)	(0.6,-1.7)	

4.2.3 不间断式声音定位测试

不间断式声源定位实测数据如表3所示。 表3 不间断式声源定位实测数据表

裡论值/cm	实测值/cm	误差/cm
(5.0,20.0)	(6.1,18.4)	(1.1,-1.6)
(5.0,35.0)	(4.2,33.7)	(0.8,-1.7)
10.0,20.0)	(10.1,21.9)	(0.1,1.9)
100.300	(10.0, 32.6)	(00.26)

())	())	())
(10.0,30.0)	(10.9,32.6)	(0.9,2.6)
(15.0,20.0)	(12.9,21.3)	(-2.1,1.3)
(15.0,35.0)	(16.2,35.0)	(1.2,0.0)
(30.0,5.0)	(30.8,6.1)	(0.8,1.1)
(30.0,15.0)	(29.4,12.8)	(-0.6,-2.2)
(35.0,5.0)	(35.2, 3.5)	(0.2,-1.5)
(35.0,35.0)	(34.3,35.0)	(0.7,0.0)
(40.0,30.0)	(40.2,32.3)	(0.2,2.3)
(45.0, 5.0)	(44.7, 3.8)	(0.3, -1.2)

不间断式移动声源行径轨迹测试如图5所示。由于液晶屏实测数据是由C8051F020单片机的坐标实测数据作比例换算并取整后的处理数据,相比理论数据而言,存在二次误差,适合定性判断移动声源的行



径轨迹。为更好地说明该系统的定位性能,本研究取 声源定位实测数据作相对误差分析,其折线分布如图 6所示。



综上所述,移动声源发声功率 P =50.1 mW,产生 占空比为10%、工作频率 f =497 Hz 的低功耗声源信 号。系统定位功能的最大绝对误差为2.6 cm,相对误 差中值为5.3%。通过按键切换,可实现持续1 s 或不 间断式发声的移动声源定位功能。

5 结束语

本研究根据TDOA算法设计了一套4路信道的声音定位系统。系统以C8051F330单片机为移动声源的主控部分,可持续1s或不间断式地发送占空比为10%的窄脉宽声源信号,有效降低了声源功耗,提高了信号辨识度,这是系统的设计初衷与创新点之一。经带通滤波、两级放大和信号整形后,较大地提高了信噪比和定位精度。而后以C8051F020单片机为数据处理核心,接收FPGA4路信道传送的脉宽计数值,判断移动声源坐标。

经实际测试,在误差允许范围内,系统可准确地

判断移动声源所在的区域,并实时显示声源坐标和行 径轨迹,具有低功耗、稳定性好、精度高、实时性佳的特 点。此外,受诸多外界因素影响,系统定位功能不可避 免地存在一定误差。一方面,由于系统的制作工艺、外 界噪声干扰和声音反射效应,降低了有效声源的信噪 比。另一方面,移动声源和拾音器接收电路在水平高 度方面的差异性与喇叭面的扩散效应也极大地影响着 系统的定位性能。为此,硬件设备的稳定工作和软件 算法的优化处理对声音定位的实时性与精度的提高起 到了至关重要的作用,并明确了系统的改进方向。

参考文献(References):

- [1] 杨文凯,郭顺天,叶 涛.小波变换在被动声源定位中应 用[J].噪声与振动控制,2005,12(6):19-21.
- [2] 龚小章.特定声音识别与定位系统[J].电子科技,2011, 24(8):36-45.
- [3] 胡 胜,杨 雷,宋 跃,等. 基于ARM7的声音导引系统的设计[J]. 自动化仪表,2010,25(12):46-49.
- [4] 韩 毅,吴初娜,李龙飞.基于到达时差的声音定位系统的研究与实现[J].计算机工程与设计,2010,31(11): 2465-2462.
- [5] 栗 苹,施聚生,崔战中. 被动声定位系统的设计与应用 [J]. 北京理工大学学报,1994(10):80-85.
- [6] 周浩洋. 基于麦克风阵列的声源定位方法研究[D]. 大连: 大连理工大学电气工程系,2002(3):2-3.
- [7] 程德志,刘国忠,罗 倩. 麦克风阵列声音信号采集系统 设计[J]. 中国科技财富,2010(1):24-25.
- [8] 周永福. 一种TDOA算法的设计[J]. 计算机光盘软件与应用,2012(6):151-152.
- [9] MITRA S K. Digital Signal Processing [M]. 3rd ed. USA: Mc Graw-Hill International Edition, 2006.
- [10] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础[M]. 4版. 北京:高等 教育出版社,2006.

[编辑:李 辉]

(上接第1014页)

- [4] JAYANTA K, CHANDRA, ASIT K, et al. Detection of defects in fabrics using subimage-basedsingular value decomposition [J]. Journal of The Textile Institute, 2012, 104 (3):295-304.
- [5] 张 恒,胡文龙,丁赤飚.基于快速连通域分析的目标特征提取算法[J].计算机工程与应用,2009,45(29): 230-232.
- [6] LIN Jie, LUO Si-wei, LI Qing-yong, et al. Real-time rail head surface defect detection: A geometrical approach [C]// Industrial Electronics 2009, ISIE 2009, IEEE International Symposium. Beijing: [s.n.], 2009:769-774.
- [7] ZHANG Wu-yi, ZHAO Qiang-song, LIAO Liang. Develop-

ment of a real-time machine vision system for detecting defeats of cord fabrics [C]// Computer Application and System Modeling (ICCASM), 2010 International Conference. Taiyuan:[s.n.],2010;539-543.

- [8] 肖术骏,朱学峰.一种改进的快速高效的差分进化算法 [J].合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(11):1-5.
- [9] 许小健,黄小平,钱德玲. 自适应加速差分进化算法[J]. 复杂系统与复杂性科学,2008,5(1):87-92.
- [10] 王 强. 运动物体检测与跟踪研究及系统实现[D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电气工程学院,2011.