

◇ 研究报告 ◇

## 实时主动声定位系统设计\*

李 缙<sup>†</sup> 张丕状

(中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室 太原 030051)

**摘要** 针对在军事演习或爆炸实验中对冲击波超压传感器位置的精确定位,设计了一种实时主动声定位系统。该系统由声信号发射系统、声信号接收处理系统和无线监控终端系统三部分组成。声信号发射系统与无线监控终端以单片机 STC12C5A60S2 作为核心控制器,接收处理系统以 ARM9 系列的 S3C2440 作为核心控制器。发射系统发射四种已知频率的声信号,接收处理系统接收并处理收到的四种声信号,然后把处理结果反馈到无线监控终端。通过实验表明,该系统在一定条件下,能够稳定地发射、接收并处理声信号,达到实时定位目标,并在 200 m 范围内将定位误差控制在厘米级内。

**关键词** 实时主动声定位, ARM9, 单片机 STC12C5A60S2

中图法分类号: TN971.+1 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)02-0232-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.02.008

## The design of real-time active acoustic location system

LI Jin ZHANG Pizhuang

(North University of China Shanxi Province Key Laboratory of Information Capturing and Processing, Taiyuan 030051, China)

**Abstract** A design scheme of real-time active acoustic positioning system is proposed, aiming at the accurate positioning of shock wave overpressure sensor position in military exercise or explosion experiment. The system includes sound signal transmission system, acoustic signal receiving and processing system and wireless monitoring terminal system. Sound signal transmission system and wireless monitoring terminal take single-chip STC12C5A60S2 as the core controller, and receiving and processing system takes ARM9 series S3C2440 as the core controller. The transmitting system emits four acoustic signals of known frequency, the receiving and processing system receives and processes the four kinds of sound signals, and then feeds the processing result back to the wireless monitoring terminal. Experiments show that the system can transmit, receive and process the acoustic signal under certain conditions, reach the real-time positioning target, and control the positioning error in the centimeter range within 200 meters.

**Key words** Real-time active acoustic positioning, ARM9, MCU STC12C5A60S2

2017-06-22 收稿; 2017-11-14 定稿

\*国防重点实验室基金项目 (9140c12040051010)

作者简介: 李缙 (1990-), 男, 山西阳泉人, 硕士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

<sup>†</sup>通讯作者 E-mail: 704446679@qq.com

## 1 引言

爆炸冲击波超压是衡量各种炸药及武器战斗部威力的重要技术指标,准确测量炸药爆炸产生的冲击波超压,可为武器研制过程中的爆炸类型判断、威力对比、性能评估提供根据<sup>[1]</sup>,因此,对超压传感器的精确定位至关重要。激光测距精度高,而且不受外界环境影响,但如果在空旷的地方测量大量的超压传感器显然是不可取的。GPS定位作为日常生活中最常用的定位方式被广泛应用在军事、民用导航及各种定位领域中,加入差分技术定位精度达到厘米级,但是在军事演习中建立差分基准站成本过高,很难到达预期要求。而实时主动声定位系统在降低成本的前提下,能够对超压传感器进行精确定位,并且具有较高实时性,具体原理如下:该系统主要采用基于声达时间差(Time difference of arrival, TDOA)的定位技术<sup>[2]</sup>,在一个200 m范围内的实验场地以阵列方式布置四个确定位置信息的声信

号发射基站,分别发射1.5 kHz、2.3 kHz、3.0 kHz和4.6 kHz四种已知频率的声信号编码,将声信号处理装置放置在需要定位的位置,通过拾音器采集声信号,并通过ARM9处理系统进行处理,经无线模块将定位信息发送到上位机,完成定位过程。实时主动声定位系统示意图如图1所示。

声定位技术早期应用于声呐,因为电磁波在海水中传播衰减较大,且传播距离受到限制,故早期水下目标探测普遍采用声波定位技术<sup>[3]</sup>。国内在声定位方面的研究起步虽晚,但是一些科研机构及高校在水声定位系统上进行了大量的研究并取得了显著的成果,而水下环境与陆地不同,水下定位系统的复杂程度较之陆地要高得多,成本也大得多,并不能直接应用于陆上定位。本文提出的声定位系统能够在一定条件下完成陆上实时精确定位,适用于爆炸实验或者军事演习中,且定位精度、实时性可以得到保障。

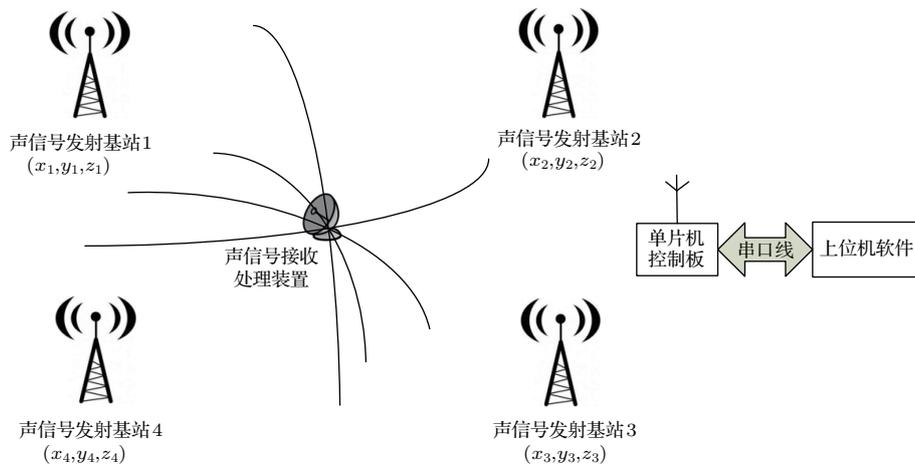


图1 实时主动声定位系统

Fig. 1 Real-time active sound positioning system

## 2 实时主动声定位硬件系统设计

实时主动声定位系统由声信号发射系统、声信号接收处理系统和无线监控终端系统三部分组成。

### 2.1 声信号发射系统

声信号发射系统由单片机控制板、EEPROM、数字电位器、无线模块、GPS模块、功率放大器、声换能器和电源组成。单片机控制板选用STC12C5A60S2作为核心控制器,是高速、低功

耗、超强干扰的新一代8051单片机,其中外围器件包括美国ATMEL公司型号为AT24C04的EEPROM,美国MAXIM公司型号为MAX5477的数字电位器,选用中心频率为433 MHz的AS13-TTL作为无线通信模块,选用瑞士u-blox公司的ATK-NEO-6M作为GPS秒脉冲授时模块。其中数字电位器与一个一阶RC低通滤波电路组成信号调理电路。本系统中功率放大电路采用D类功放,主要由脉冲宽度调制(PWM)比较、功率放大及输出滤波

组成,用于提升信号功率驱动声换能器发声。声换能器选用额定功率为150 W、阻抗为8  $\Omega$ 的扬声器。电源为12 V蓄电池,单片机控制板通过LM7805稳压芯片将12 V电压转换为5 V电压供电,功率放大器采用12 V电压供电。声信号发射系统硬件示意图如图2所示。

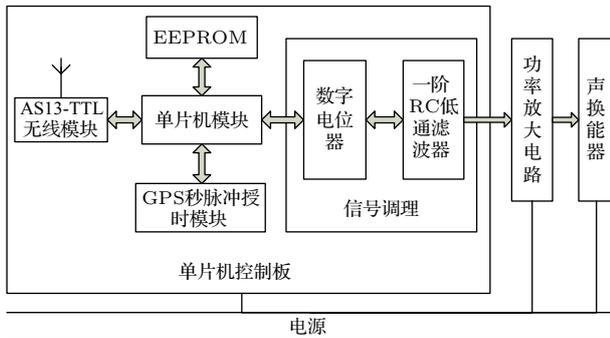


图2 声信号发射系统硬件示意图

Fig. 2 The acoustic signal transmission system hardware diagram

工作原理:单片机控制板通过AS13-TTL无线模块接收由无线监控终端发来的声信号,四种频率的声信号分别由四个声信号发射系统识别并接收,接收到发声命令后,打开单片机上由GPS秒脉冲触发的外部中断,进入中断打开定时器,定时器控制编码按位发送,进入信号调理模块,经数字电位器改变编码幅值大小,再通过一阶RC低通滤波器滤除高频谐波成分,然后通过功率放大电路进行功率放大,驱动声换能器发出声信号。

## 2.2 声信号接收处理系统

声信号接收处理系统由声传感器、对数放大电路、滤波电路、A/D转换模块、ARM9处理系统、无线模块和移动电源组成。声传感器使用松下公司WM-61A全向电容式驻极体,安装在靠近放大电路输入端的位置。前置对数放大电路兼具线性和对数放大功能<sup>[4]</sup>,增益随输入信号的变化而变化,基本具备了自动增益控制功能,本电路采用ADA4661-2作为输入/输出放大器。滤波电路为两个Sallen-Key结构的二阶带通滤波器串联构成的四阶带通滤波器,带宽10 kHz,中心频率 $f_m = 5.5$  kHz,增益 $A_m = 1$ <sup>[5]</sup>,电路中采用ADA4898-2YRDZ作为双运算放大器。ARM9处理系统采用韩国三星公司的S3C2440为核心处理器,它是三星公司基于

ARM920T为核心,16/32位精简指令集的微处理器<sup>[6]</sup>,因为系统要求较高的实时性,而这款处理器的内核时钟频率一般达到400 MHz,满足实时性的要求。依旧选用AS13-TTL作为无线通信模块。其中ARM9处理系统需要5 V移动电源进行供电,信号调理电路通过ARM9系统电压转换采用3.3 V供电。声信号接收处理系统硬件示意图如图3所示。

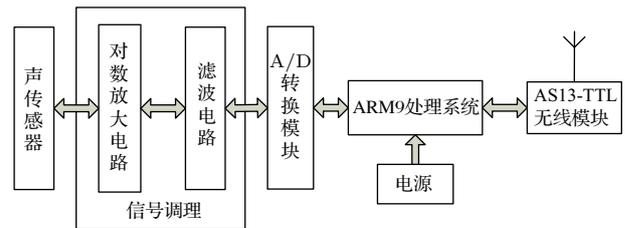


图3 声信号接收处理系统硬件示意图

Fig. 3 The acoustic signal receiving and processing system hardware diagram

工作原理:声传感器接收四个基站发射的声信号后,将接收到的声信号转换为电信号,经过对数放大电路进行自动增益处理和四阶带通滤波器滤波处理,通过A/D转换模块转换为数字信号后,进入ARM9处理系统对数字信号进行存储并实时处理,处理结束将处理结果经AS13-TTL无线模块发送到无线监控终端。

## 2.3 无线监控终端系统

无线监控终端系统由计算机、单片机控制板、无线模块和电源组成。上位机软件安装在计算机上,相关指令操作均利用上位机软件实现。单片机控制板依旧选用STC12C5A60S2作为核心控制器,通过USB转串口线与计算机相连。选用AS13-TTL作为无线通信模块。电源为12 V蓄电池,经过稳压芯片转换为5 V为单片机控制板供电。无线监控终端系统示意图如图4所示。

工作原理:无线监控终端实现两部分功能。第一,上位机通过USB转串口线将声信号编码发送到单片机控制板,再经AS13-TTL无线模块发送到四个声信号发射系统,执行一些指令,比如打开发声、关闭发声等,与编码发送过程相同。第二,无线监控终端接收处理数据结果时,终端天线将数据接收,经串口将数据传给单片机,单片机再通过串口将数据传回上位机,以便分析处理结果。

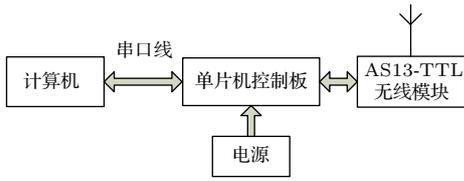


图4 无线监控终端系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the wireless monitoring terminal system

综上所述,三大硬件系统的相互结合构成了实时主动声定位的硬件系统,在一定条件下,具有较高的稳定性和实时性,实验结果验证后续小节分析,此处不再赘述。

### 3 实时主动声定位系统软件实现

在实时主动声定位系统中,重点与难点在于实时性的提高。在单片机发射声信号编码时,每个声信号发射系统在1 s内发送240位编码,四种声信号编码频率从低到高单周期编码位数分别为24位、16位、12位、8位,特征信号单周期编码位数为48位,比如1.5 kHz声信号编码包括六个周期前端信源信号、一个周期特征信号、两个周期后端信源信号,依此类推。单片机使用11.0592 MHz时钟,十二分频,定时器装入的初值为25,  $240 \times (1/(11.0592 \text{ MHz}/12/25)) \approx 6.51 \text{ ms}$ ,这也就意味着在GPS秒脉冲授时模块每一秒进入外部中断打开定时器发送编码时,仅需6.51 ms就可以完成发送,可以保证声信号接收处理系统每一秒接收一次完整的声信号编码,可供处理系统存储并处理。保证实时性的关键是在声信号接收处理系统,这里着重介绍声信号处理系统软件实现过程。

声信号接收处理系统采用了基于ARM9 (S3C2440)的 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 实时操作系统来处理接收的声信号编码。在声信号接收处理装置的ARM中,

通过定时器依次触发2路DMA(直接存储器存储),DMA0与DMA2对AD进行读启动,DMA设置初始传输计数值为100000,传输完成进入DMA中断。定时器设定100 kHz的频率触发DMA通道,使AD以100 kHz的采样率对接收到的声信号进行A/D转换。整个过程处在一个大循环中,定时器触发DMA0通道将十万个数据存入数组1,进入DMA0中断将定时器关闭,打开DMA2通道对第二组数据进行采集并存入数组2,与此同时数组1的数据已开始处理,处理数据时间一定是大于存储数据时间的,处理结束后通过信号量告知数组2开始处理同时数组1开始采集第三组数据,如此循环,完成每一次采集与处理。

声信号处理过程耗时最长,对系统实时性起到决定性作用。处理数据过程中,首先对声信号数据求信息熵和能量,与特征信号相关运算,找到特征信号起始点,由于在特征信号前端有391个采样点为信源信号,所以在特征信号前推300点并截取256点信源信号求快速傅里叶变换(FFT)识别频率<sup>[7-8]</sup>。再分别前推391点找到信源信号起始点为 $P_{1.5}$ 、 $P_{2.3}$ 、 $P_{3.0}$ 、 $P_{4.6}$ ,根据公式(1)计算每两个声发射点到声接收点距离的差值,

$$\begin{aligned} \Delta d_{12} &= (P_{1.5} - P_{2.3}) \cdot T_s \cdot v, \\ \Delta d_{13} &= (P_{1.5} - P_{3.0}) \cdot T_s \cdot v, \\ \Delta d_{14} &= (P_{1.5} - P_{4.6}) \cdot T_s \cdot v. \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, $T_s$ 为采样周期, $v$ 为声速340 m/s(一个标准大气压,15 °C,需根据实际环境决定)。

根据图1可知四个基站位置坐标,设待测目标位置坐标为 $(x, y, z)$ ,利用TDOA算法,根据差值与声接收系统位置两两建立双曲面,四个点建立的三个双曲面方程,如方程组(1)所示。将公式(1)带入方程组(2),

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} = \Delta d_{12}, \\ \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} = \Delta d_{13}, \\ \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} = \Delta d_{14}, \end{cases} \quad (2)$$

利用牛顿迭代法求解得出的结果即为待定位目标位置,最后将求出的坐标通过无线发送到上位机。

通过多次实验验证,声信号处理总时长控制在4.7 s左右,上下相差0.3 s,基本实现实时定位。

## 4 实时主动声定位系统定位盲区

### 4.1 系统盲区的产生

本声信号发射系统中,发射编码用时 6.51 ms,声速以 340 m/s 计算时,对应传播距离为  $s = v \times t = 340 \text{ m/s} \times 6.51 \text{ ms} = 2.2134 \text{ m}$ 。当声传感器与两个基站距离差小于 2.2134 m 时,接收处理系统接收到的信号会产生混叠,我们将声信号混叠的区域定义为定位盲区。若在边长为 200 m 的正方形实验场地进行实验,以十字形方式布设基站,各基站坐标分别为  $A(100, 0)$ 、 $B(0, 100)$ 、 $C(-100, 0)$ 、 $D(0, -100)$ , 设声传感器所在位置坐标为  $(x, y)$ , 根据两点间距离公式可得不等式组 (3):

$$\begin{cases} \left| \sqrt{(x-100)^2 + y^2} - \sqrt{x^2 + (y-100)^2} \right| \leq 2.2134, \\ \left| \sqrt{(x-100)^2 + y^2} - \sqrt{(x+100)^2 + y^2} \right| \leq 2.2134, \\ \left| \sqrt{(x-100)^2 + y^2} - \sqrt{x^2 + (y+100)^2} \right| \leq 2.2134, \\ \left| \sqrt{x^2 + (y-100)^2} - \sqrt{(x+100)^2 + y^2} \right| \leq 2.2134, \\ \left| \sqrt{x^2 + (y-100)^2} - \sqrt{x^2 + (y+100)^2} \right| \leq 2.2134, \\ \left| \sqrt{(x+100)^2 + y^2} - \sqrt{x^2 + (y+100)^2} \right| \leq 2.2134, \end{cases} \quad (3)$$

只要待测目标位置满足式 (3) 中任意不等式, 则认为待测目标处在定位盲区。使用 MATLAB 绘制不等式组的解如图 5 所示, 图 5 中红色区域即为定位盲区。

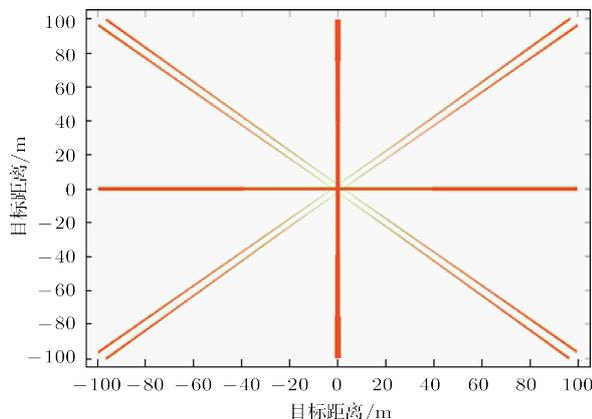


图5 定位盲区仿真图

Fig. 5 Simulation map of locating blind zone

### 4.2 定位盲区解决方法

解决定位盲区问题可以从以下三个方面考虑:

(1) 从声信号编码方式入手,减少编码长度,缩短发射声信号时长,从而减小盲区范围。但是减少编码长度后信号处理算法也相应改变,能否有效地处理声信号,还需进一步考证。

(2) 从声信号相位控制入手,各基站依次发声,使声信号完全不重叠,可以彻底解决定位盲区问题。但是考虑到每次发声时环境因素的影响,这种方法会对定位带来一定误差。目前正在通过室内仿真的方法,每个基站声信号延时发送,在有限范围内可避开盲区。

(3) 增加基站的数量可以缩小盲区范围。比如有五个发射基站,有两个基站声信号发声重叠,剩余三个基站信号正常分离即可得到结果。但是由于基站数量的增加,接收处理装置数据会增多,对硬件资源和软件算法相应提高要求,而且会提高系统成本,因此,根据实际情况确定基站数目为宜。目前,本系统中采用四个基站较为合适。

目前,本系统中定位盲区问题尚未彻底解决,只能通过上述方法缩小盲区范围,由于信号分离算法的复杂度,系统运算量也会随之增大,如何分离混叠的声信号并达到硬件系统原有的性能,还需进一步研究。

## 5 实验测试

在风速较低、空旷的室外,根据实时主动定位系统示意图,放置四个声信号发射基站,分别发射四种已知频率的声信号编码,声信号接收处理系统接收到声信号后,进行存储并经去除直流分量后波形如图 6 所示,采样频率为 100 kHz。从图 6 中可以看出,四种声信号明显分成四段,中间有环境噪声或者回音对其干扰。

从图 6 截取第四段放大如图 7 所示,从图 7 中大致看出有 6 个周期信源信号, 1 个周期特征信号和 2 个周期信源信号,初步判定是 1.5 kHz 声信号,由于声信号频率越低传播距离越远,实验场地中发射 1.5 kHz 声信号的基站距离最远,是四种频率声信号中最后一种到达接收点的声信号,达到预想要求。

声信号进入接收处理装置,通过求解信息熵和信号能量,与特征信号求解相关系数,从而找到信号起始点,再利用快速频率识别求解出四种频率,求解结果如表 1 所示。在快速测频过程中,有两次频率识别,第一次识别中若大于 75% 则认为频率识别成功;

若小于75%则进入第二次频率识别，第二次识别中大于20%则认为频率识别成功；若两次频率识别都未识别成功则认为识别失败。第三种声信号快速测频百分比为62.15%，显然是第二次频率识别中识别成功而得。

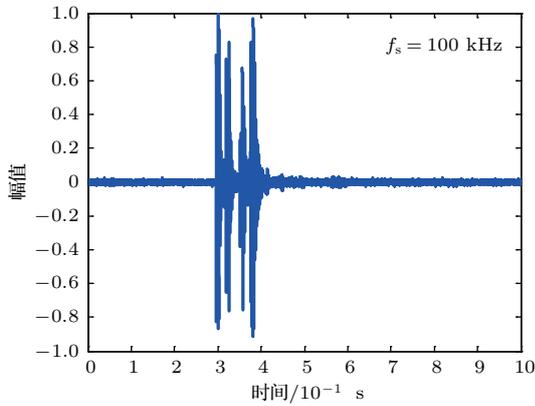


图6 陆上实时声定位采集声信号波形

Fig. 6 Acquired sound waveform of real-time acoustic positioning system on land

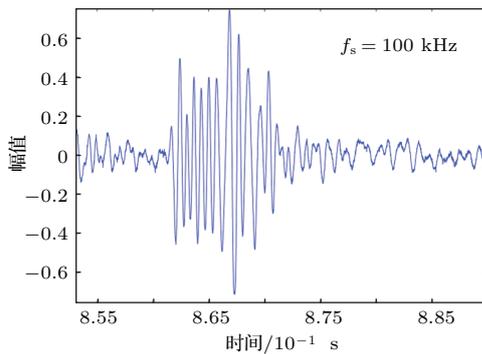


图7 第四段声信号波形放大图

Fig. 7 The fourth paragraph of the acoustic signal waveform amplification

表1 四种声信号频率识别结果

Table 1 Four kinds of acoustic signal frequency recognition results

识别结果	频率/Hz			
	1536	2304	3072	4608
起始点	32756	30367	27781	24713
快速测频百分比	96.99%	80.11%	62.15%	87.88%

通过实验可得，基站1与基站2、3、4的距离差分别为7.9363 m、16.5269 m、26.7188 m，利用全站仪测得的距离差分别为7.44523 m、16.4421 m、26.5782 m，则误差分别约为49.1 cm、8.5 cm、

14.1 cm，误差控制在厘米级。根据距离差两两建立双曲面后，交点即为待定位目标位置，完成实时定位任务。

## 6 结论

本文针对在军事演练或爆炸实验中对冲击波超压传感器的精确定位设计了一种实时声定位系统。通过对实验数据进行分析得出，当误差控制在厘米级内，完全能够满足定位要求，再对算法进行优化，还可以提高系统实时性。因此，误差的控制与实时性的提高有效增强了本系统的实用性。本系统中存在定位盲区，由于盲区范围有限，对系统影响较小。综上所述，本文提出的实时主动声定位系统可以应用在军事、生活中，具有极大的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 张哲. 冲击波场无线传感器节点的设计与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2009.
- [2] Tang H, Park Y, Qiu T. A TOA-AOA-based NLOS error mitigation method for location estimation[J]. Journal on Advances in Signal Processing, 2007, 2008(1): 1-14.
- [3] 柯昆. 声源定位技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [4] 黄梓瑜, 高文刚, 谭威, 等. 宽范围微弱电流对数放大电路设计与仿真 [J]. 工业控制计算机, 2013, 26(6): 130-131. Huang Ziyu, Gao Wengang, Tan Wei, et al. Design and simulation of a wide range of weak current logarithmic amplifying circuits[J]. Industrial Control Computer, 2013, 26(6): 130-131.
- [5] 郭农斐, 袁放成. 四阶RC有源带通滤波器的设计 [J]. 泉州师范学院学报, 2007, 25(4): 35-37. Guo Nongfei, Yuan Fangcheng. Design of fourth-order RC active band-pass filter[J]. Journal of Quanzhou Teachers College, 2007, 25(4): 35-37.
- [6] 王玉林. 基于S3C2440硬件平台的Windows CE移植 [J]. 科技创新与应用, 2013(22): 47-48. Wang Yulin. Windows CE transplantation based on S3C2440 hardware platform[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2013(22): 47-48.
- [7] 季虎, 夏胜平, 郁文贤. 快速傅立叶变换算法概述 [J]. 现代电子技术, 2001(8): 5-8. Ji Hu, Xia Shengping, Yu Wenxian. An overview of fast Fourier transform algorithm[J]. Modern Electronics Technique, 2001(8): 5-8.
- [8] 何成建, 张丕状. 基于实时主动声定位的快速测频算法 [J]. 应用声学, 2017, 36(1): 41-47. He Chengjian, Zhang Pizhuang. Fast frequency measurement algorithm based on real-time active acoustic positioning[J]. Journal of Applied Acoustics, 2017, 36(1): 41-47.