

海洋环境噪声接收机的设计与实现^{*}

徐灵基 杨益新

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘要: 针对海洋环境噪声的测量,设计了一种低噪声、宽带、高动态范围的水声接收机。采用新一代真有效值转直流芯片 AD8436 实现噪声信号有效值的实时高精度计算,并通过微控制器调整程控增益放大器的增益码完成自动增益控制,同时自动记录系统增益值。该接收机具有良好的人机交互接口,既可在线传递系统的增益,又可按用户需求设定固定的增益。实验测试表明,该接收机的等效输入自噪声小等于 $3 \mu\text{Vrms}$,频率带宽为 20 Hz~5.5 kHz,信号输入的动态范围大等于 68 dB;且具有精度高、适应性强和电路性能稳定等特点,可较好地满足海洋环境噪声的测量与分析。

关键词: 海洋环境噪声;水声接收机;真有效值转直流;自动增益控制;增益记录

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4032

Design and implementation of ocean ambient noise receiver

Xu Lingji Yang Yixin

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A low-noise, broadband, high dynamic-range underwater acoustic receiver is designed to measure ocean ambient noise. First, new generation true RMS-to-DC chip AD8436 realizes real-time high-precision calculations of RMS value of the noise signal. Then, microprocessor is used to implement AGC by adjusting the gain code of programmable gain amplifier. Meanwhile, the system gain values are automatically recorded. The receiver has an excellent man-machine interactive interface, through which the gain values are transferred to the embedded host computer online and the system gain can also be set according to customer's requirement. The experiment result shows that the equivalent input noise of the receiver is lower than $3 \mu\text{Vrms}$, the frequency band is 20 Hz~5.5 kHz, and the input dynamic range is larger than 68 dB. Besides, the designed receiver is precise, flexible and stable. Therefore, it can satisfy the demand of measurement and analysis of ocean ambient noise.

Keywords: ocean ambient noise; underwater sound receiver; true RMS-to-DC; automatic gain control; gain storage

1 引言

海洋环境噪声是水声信道中的一种干扰背景场,它干扰系统的正常工作,限制装备性能的发挥。工程上将海洋环境噪声视为各向同性的,但实际上由于噪声源本身的指向性、空间分布和海洋传播条件等原因,海洋环境噪声是具有指向性的。例如,风浪噪声具有垂直指向性,而远处行船的辐射噪声具有水平指向性^[1-2]。研究海洋环境噪声,旨在解决海洋环境噪声级及其时空统计特性与环境因素之间的依赖关系,找出其规律并由此做出必要的预报,为水声设备的设计、研制以及使用提供必要的数据,以提高设备的抗干扰能力。而海洋环境噪声的测量则是研究分析海洋环境噪声及其时空特性的基础。由于海洋环境噪声具有明显的时

变性,接收到的噪声信号表现出很大的动态范围,因此需要在接收机内使用自动增益控制(automatic gain control, AGC)来进行动态范围压缩。

现有水声接收机一般都是使用检波器检出水声信号的包络,再经过门限比较电路与增益判决电路判定接收机增益并通过增益可控电路改变增益来实现自动增益控制的,其增益数值是未知的^[3-6]。然而,测量海洋环境噪声不仅要得到高保真放大后的信号,还需要记录放大倍数以便分析海洋环境噪声;而且,海洋环境噪声信号是随机信号,峰均比很大,使用包络检波可以缩短信号电平突变所需的响应时间,但会影响电路的稳定性,因为瞬态噪声尖峰可以激活 AGC 检测电路。

为此,研究并设计了一款可用于海洋环境噪声测量的

收稿日期:2015-08

* 基金项目:国家自然科学基金(11274253)资助

水声接收机(以下简称接收机),通过采用新一代真有效值转直流芯片 AD8436 来得到输入噪声信号的即时精确的有效值,使增益控制环路能够实时跟踪输入信号并精确控制接收机增益,较好地满足海洋环境噪声测量高精度的要求;微控制器以及增益记录和控制接口的采用,使接收机在实现增益自动控制的同时可以自动记录实时增益数值,而且可以对接收机增益进行重新设置,以满足在不同时段、不同海区海洋环境噪声测量的特殊需要。

2 增益控制原理与接收机方案设计

目前 AGC 放大电路主要通过以下几种方法来实现^[7]:

1)通过改变同相或反相放大电路的输入电阻或反馈电阻来改变增益,主要是使用数字电位器、电流输出型 D/A 或集成模拟开关+精密电阻构成的电阻网络作为输入电阻或反馈电阻;2)通过固定增益放大器+电阻衰减网络的模式来改变增益,电阻网络构成方式和方法一类似;3)通过改变可变增益放大器的增益控制电压来改变增益,其增益可以连续变化;4)通过改变可编程增益放大器的增益控制码来改变增益,其增益是步进变化的。这几种方法中,第四种方法实现的增益是离散的,能够在离散的增益点上对电路进行优化,得到很好的性能;其电路结构简单,使用方便,成本低,频带宽,虽然增益选择范围小但精确度高,可以满足海洋环境噪声测量的应用要求。本文测量海洋环境噪声的水声接收机设计方案如图 1 所示。

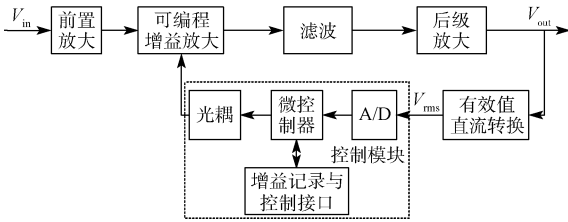


图 1 海洋环境噪声测量用水声接收机的原理框图

输入信号经前置放大后进入可编程增益放大器进行放大,放大器的放大量受控于微控制器输出的增益控制码。有效值直流转换器对后级放大电路的输出信号进行有效值检测,检测后的信号通过 A/D 进入微控制器对信号的有效值进行判决。根据信号有效值判决门限,由微控制器计算出接收机增益,并产生控制可编程增益放大器放大量的增益控制码。增益自动控制原理如图 2 所示。接收机可以通过增益记录接口与上位机连接,将增益数值实时传递给上位机以便实时分析。根据实际测量需要,上位机也可以通过该接口对接收机增益、有效值判决门限等进行设置。

输入的噪声信号 V_{in} 经放大和滤波后,由有效值直流转换器检测出其有效值 V_{rms} ,再通过 A/D 送入微控制器进行门限比较与增益判决。根据要求,微控制器软件程序设有最高门限阈值 V_H 和最低门限阈值 V_L , V_{rms} 分别与 V_L 、 V_H 进行比较,然后经软件判断及计算产生增益控制码:当

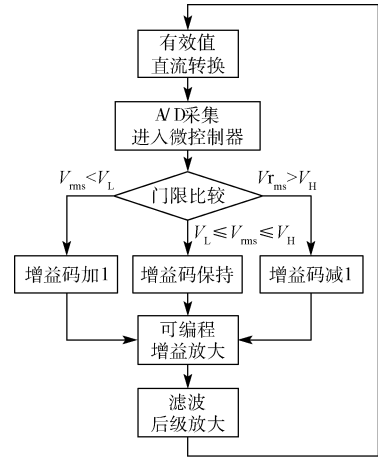


图 2 自动增益控制流程图

$V_L \leq V_{rms} \leq V_H$ 时,微控制器输出的增益控制码不做调整,增益保持原值不变;当 $V_{rms} < V_L$ 时,微控制器输出的增益控制码加 1 使增益增加一个步长,可编程增益放大器增大对输入信号 V_{in} 的放大,输出信号 V_{out} 增大, V_{rms} 也相应增大,直至 $V_L \leq V_{rms} \leq V_H$,增益控制码停止调整;当 $V_{rms} > V_H$,微控制器改变输出的增益控制码,使增益减小一个步长,可编程增益放大器减小对 V_{in} 放大,输出 V_{out} 减小, V_{rms} 也相应减小,至 $V_L \leq V_{rms} \leq V_H$ 停止调整增益控制码,这样就完成了对噪声有效值的跟踪与控制。上下门限 V_H 、 V_L 可以通过增益记录与控制接口来重新设置,为保证接收机有足够的动态范围, V_H 、 V_L 须满足:

$$20 \lg \frac{V_H}{V_L} > 20 \text{ dB} \quad (1)$$

在自动增益控制过程的任何时候,一旦微控制器接收到上位机的增益控制指令,则立即执行增益控制指令直到指令解除。

3 电路设计

前置放大电路主要功能是对水听器输出的信号进行初级放大,隔离信号源与后级放大电路之间的耦合作用。由于水听器输出微弱的电压信号,因此前级放大电路必须具有低功耗、低噪声、高内阻和高抗干扰能力^[8]。前置放大电路选用低噪声差分输入仪表放大器 AD8221,以保证接收机的抗共模干扰能力,提高检测微弱信号的能力。

考虑到现代声纳工作频率逐渐降低等因素,本文设计的海洋环境噪声测量频带范围为 20 Hz~5.5 kHz。滤波电路是用一个截止频率为 20 Hz 的 RC 无源高通滤波器和一个截止频率为 5.5 kHz 的有源低通滤波器组成 20 Hz~5.5 kHz 的带通滤波器。有源低通滤波器采用一片模拟集成有源滤波器 MAX275 构成四阶巴特沃斯低通滤波电路,其带宽和放大量都可以通过外接电阻方便地进行设计和调整,使用 Maxim 公司提供的滤波器设计软件可以快捷地确

定各外接电阻。所设计的带通滤波电路的实测幅频特性如图3所示。

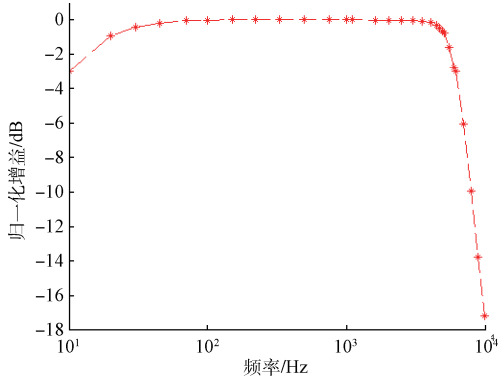


图3 带通滤波器实测幅频特性曲线

后级放大电路是为了增加余量,调整通道的不一致性,驱动大容量负载而设计的。选用具有很强容性负载驱动能力的运算放大器 AD8620 构成同相放大电路完成上述功能。

3.1 数字可编程增益仪表放大器 AD8253

可编程增益放大器是接收机的核心部件,其接收微控制器输出的增益控制码,调整接收机增益进而压缩动态范围。在原理框图1中,选用数字可编程增益仪表放大器 AD8253,其具有 $G\Omega$ 级输入阻抗、低噪声、低失真性能以及精密线性性能和稳定的 2-bit 并行数字接口,允许用户对 1、10、100、1000 的增益进行数字化编程。

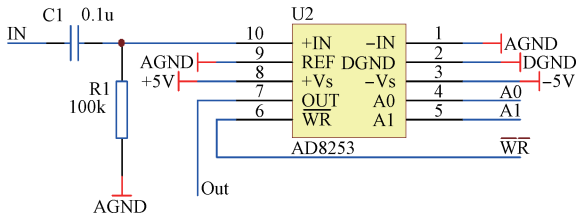


图4 可编程增益放大电路

AD8253 的增益可用两种方法设置:透明增益模式和锁存增益模式。本文采用锁存增益模式,如图4所示,管脚 \overline{WR} 、A1 与 A0 分别接收微控制器输出的增益锁存码和增益控制码,当 \overline{WR} 信号从逻辑高电平(5 V)转换到逻辑低电平(0 V)时,在它的下降沿上读取 A0 和 A1 上的电压,这会锁存 A0 和 A1 上的逻辑电平,从而改变放大器的增益。上电时,AD8253 在锁存增益模式下默认增益为 1,其锁存增益模式的真值表逻辑电平如表1所示。

3.2 真有效值转直流器 AD8436

有效值转直流电路的功能是检测后级放大电路输出信号的有效值,并将有效值(root mean square, RMS)以直流的形式输出,然后送入微控制器的 A/D 进行采集,电路如图5所示。选用新一代精密线性跨导、低功耗均方根-直流

表1 AD8253 在锁存增益模式的真值表逻辑电平

\overline{WR}	A1	A0	增益
高至低	低	低	变化为 1
高至低	低	高	变化为 10
高至低	高	低	变化为 100
高至低	高	高	变化为 1000
其它	X ¹	X ¹	不变

注:X¹ = 无关

转换器 AD8436,在高低幅度时性能均不会受开关电路的限制,可以适应海洋环境噪声信号。对于采用非外部调整输入范围 $100 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ 至 3V_{rms} 的信号,AD8436 可以精确得到信号 RMS 的直流等效值。

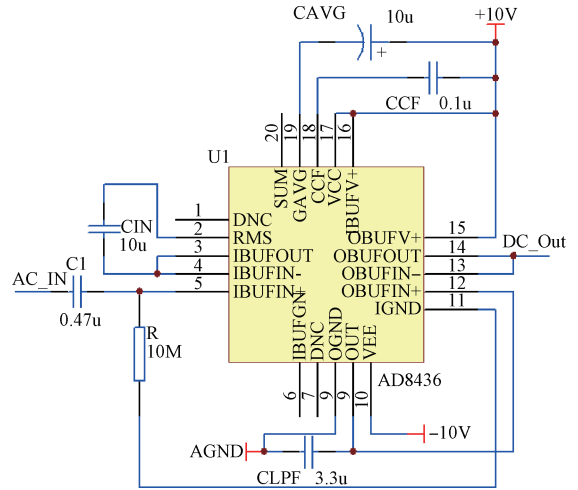


图5 有效值转直流电路

输入耦合电容 C_{IN} 的作用是使转换器自带的输入缓冲器偏移电压不对整体误差产生贡献。波峰因数电容 C_{CF} 的作用是避免突发波形的干扰。平均电容 C_{AVG} 的功能是计算信号平方的平均值,其值决定了 RMS 转换的精度。RMS 转换产生一个两倍输入信号频率的纹波成分。纹波可以通过增加平均电容 C_{AVG} 或转换后滤波电容 C_{LPF} 来减小,但 C_{LPF} 能更高效的减小纹波。只需在 OUT 引脚和地接一个电容 C_{LPF} ,即可高效减小纹波, C_{LPF} 电容值可由下式确定

$$f_{\min} = \frac{1}{2\pi RC_{\text{LPF}}} \quad (2)$$

式中: R 为固定 $16 \text{ k}\Omega$, f_{\min} 为有效值计算的最低频率。

3.3 主控模块

主控模块是实现接收机功能的关键所在,其主要功能有:采集有效值转直流电路得到的海洋环境噪声信号的有效值;比较此有效值与预定的电压门限值并输出增益控制码到可编程增益放大器 AD8253 进而调整接收机增益;采用 RS422 串口方式与上位机通信,将每次更新得到的接收机增益量传递给上位机,并接收上位机发送的指令来设定

接收机增益^[9]。主控模块包括微控制器、A/D、光耦以及增益记录与控制接口,如图 1 所示。

微控制器采用 Silicon Labs 的 8 位高性能单片机 C8051F021,其内部集成了与 8051 兼容的高速 CIP-51 内核和一个 12 位 8 通道模数转换器 ADC0^[10]。ADC0 最大转换速率高达 100 ksp/s,完全可以满足本应用采集信号有效值以及增益控制的要求,因此未采用独立的 A/D。采用光耦电路的目的是隔离 C8051F021 与 AD8253,避免数字信号对 AD8253 产生干扰,同时将 C8051F021 的 +3.3 V 电平转换为 AD8253 需要的 +5 V 电平。微控制器通过由 MAX490 构成的 RS422 全双工串行接口与上位机通信,发送接收机增益值或者接收上位机的增益设定指令。

4 软件设计

接收机软件主要由初始化程序、AD 采集与增益控制程序和串口通信程序等,软件流程如图 6 所示。

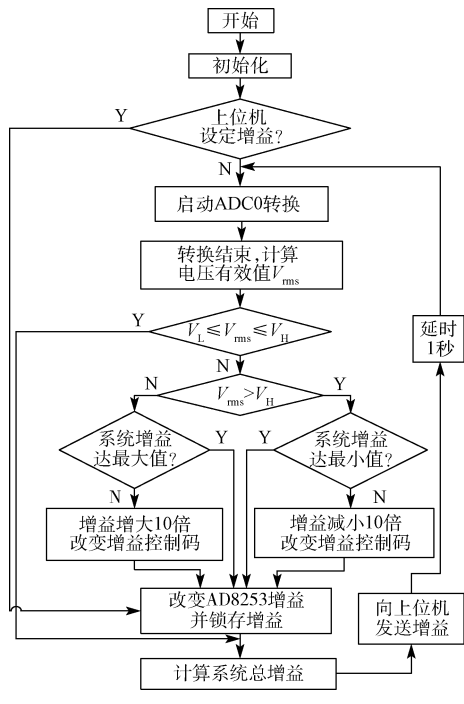


图 6 接收机软件流程图

工作过程为:开机初始化完成后,判断是否有上位机增益控制指令,若有则直接输出增益控制码和锁存码改变接收机增益,若没有则启动 ADC0;ADC0 对有效值直流转换器 AD8436 的输出进行采集,将得到的有效值和门限值进行比较并确定接收机增益,输出两位增益控制码和一位增益锁存码到 AD8253 进而改变其放大倍数,然后将接收机增益传递给上位机,延时大约 1 s 后再重复上述步骤。在开机初始化完成后的整个过程中,接收机接收到上位机的增益控制指令,则立即执行直至指令解除。

5 上位机的人机交互界面

上位机的人机交互界面软件利用 VC++6.0 编写,交互界面如图 7 所示。界面分为 3 部分:串口设置部分用来设置上位机的串口,包括串口端、波特率、校验方式、数据位、停止位,使上位机和水声接收机能够顺利地通过串口方式通信;数据接收部分的作用是观察、存储水声接收机增益调节过程中的接收机增益量;最后一部分用于设置接收机增益,选择增益档位并点击“设定”即可以该档位增益对接收信号进行放大,点击“取消”将接收机切换至自动增益控制状态,增益档位与 AD8253 相对应。

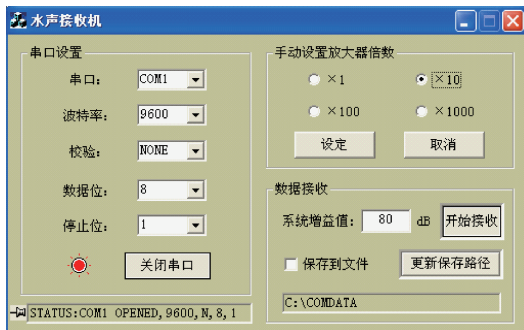


图 7 上位机的人机交互界面

6 接收机性能与技术指标

6.1 输入输出特性

输入输出特性是指输入电压 V_{in} 与输出电压 V_{out} 之间的关系。图 8 给出了输出电压随输入电压变化的关系曲线。当 V_{in} 大于起控电压时,增益控制开始起控。由图 8 可见,在上下门限之间电压呈分段线性变化。当输入信号由小到大或由大到小连续变化时,输出电压值作锯齿状波动。在 AGC 正常完成后,输出电压将稳定在上下限电平之间^[11]。

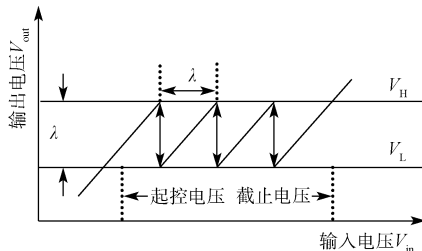


图 8 接收机输入输出特性

6.2 主要技术指标

按照本文的设计,完成了海洋环境噪声测量用水声接收机的实际制作,如图 9 所示。经过调试与实验,本文所设计的水声接收机现已达到的指标如下:

供电方式:±12 V;

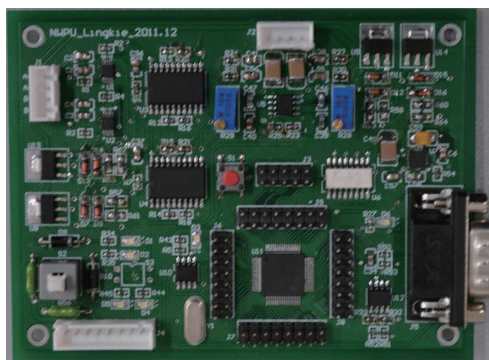


图9 接收机实物图

工作频带:20 Hz~5.5 kHz(满足典型海洋环境噪声频带),带外衰减 ≥ 20 dB,带内波纹 ≤ 1 dB;

输入动态范围: ≥ 68 dB(20 μ V_{p-p}~50 mV_{p-p});

前置放大器输入阻抗: ≥ 1 M Ω ;

等效输入端噪声: ≤ 3 μ V_{rms};

接收机增益:在 40~100 dB 范围内以 20 dB 间隔步进。

7 结 论

本文设计并实现了一种用于测量海洋环境噪声的水声接收机。该接收机可以在 40~100 dB 以 20 dB 为步长进行自动增益控制,也可以按照上位机控制指令实现 40 dB、60 dB、80 dB 或 100 dB 的固定增益放大。接收机动态范围达 68 dB 以上,能够在 20 Hz~5.5 kHz 频带内对大动态范围的海洋环境噪声信号的进行有效接收且实时记录增益的。上位机人机交互界面的设计,使用户在 Windows 界面上便可以清楚地观察记录或设置接收机增益。

配合数据采集系统,该接收机可以实现对海洋环境噪声的长时间连续接收与采集,可用来评估某一实验海区在特定时段内的噪声量级、分析噪声的空间指向性,为水声设备的设计、研制以及使用提供必要的的数据。实验证明,接收机在 20 Hz~5.5 kHz 范围内能很好的满足海洋环境噪声测量的要求,也适用于水下目标探测系统微弱信号的检测和预处理,可推广用作通用的水声信号接收机。

参考文献

- [1] BUCKINGHAM M J. Theory of the directionality and spatial coherence of wind-driven ambient noise in a deep ocean with attenuation [J]. Journal of Acoustical Society of America, 2013, 134 (2): 950-958.
- [2] 马超,乔纯捷,王跃科. 水下监测系统中水平指向性噪声实时测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6): 610-616.
- [3] 王峰,赵俊渭,白银生,等. 一种高精度通用水声接收机的设计与研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 25 (6): 249-252.
- [4] 康真威. 一种前置信号预处理电路模块的设计[J]. 声学与电子工程, 2010, 99(3): 38-40.
- [5] 巍巍,张效民. 低功耗水声接收机系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(4): 87-90.
- [6] 杨康,杨成,夏伟杰. 成像声呐 TVG/AGC 电路的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 5-9.
- [7] 李丹. 可变增益放大器的研究与设计[D]. 上海:上海交通大学, 2009: 1-40.
- [8] 李小英,耿涛. 超宽频低噪声接收机设计[J]. 声学与电子工程, 2006, 82(2): 13-17.
- [9] 江贤志,刘华章,张教育,等. 基于 C8051F020 单片机的 RS485 串行通信设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 121-124.
- [10] 王佳顺,陆小龙,赵世平. 基于 C8051F020 的高精度电传感器信号采集模块[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3): 104-106.
- [11] 苗康乐,杨日杰,杨成伟. 高精度声呐信号预处理系统的改进与实现[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2720-2725.

作者简介

徐灵基,博士生,研究方向为水声信号处理及系统设计。

E-mail: xulingji@mail.nwpu.edu.cn

杨益新(通信作者),教授,博导,目前主要研究方向为阵列信号处理、信号检测与估计和水声系统设计等。

E-mail: xyang@nwpu.edu.cn