

基于超声波的过金属壁无线通信系统研究

孙云哲, 杨定新, 胡 政, 侯宝建, 赵 红, 胡海峰

(国防科学技术大学 装备综合保障技术重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要:该文针对密闭金属结构内、外高可靠性通信方法等关键技术进行了理论与实验研究,提出了过金属壁双向信号可靠性数据传输方法,分别为由外向内的数字幅度调制数据传输和由内向外基于阻抗调制式的数据传输方式。同时研究了基于随机共振原理的微弱信号增强传输方法,提高了噪声背景下过金属壁数字信号传输的可靠性。构建了密闭金属结构内部状态监测的实验平台,对数据传输进行实验测试,验证了密闭金属容器内部温度传感器的数据传输特性,最后实现了 4.8 kbit/s 的数据传输速率,表明了该系统方案具有实际工程应用价值。

关键词:密闭金属结构;无线数据传输;压电换能器;超声应用;阻抗调制

中图分类号: TN384

文献标识码: A

Research on the Wireless Communication System Through a Metal Wall Based on Ultrasonic

SUN Yunzhe, YANG Dingxin, HU Zheng, HOU Baojian, ZHAO Hong, HU Haifeng

(Lab. of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper focused on the key technologies of high reliability communication method through a metal wall in theory and experiment based on ultrasonic. The bi-directional reliability data transmission methods are presented. They are the digital amplitude modulation when the data transmits from the external to the inside and the data transmission based on impedance modulation from internal to external. Meanwhile, the weak signal-enhanced transmission methods based on the stochastic resonance theory is studied. The reliability of digital signal under noise background is improved. Then an experimental platform to monitoring the internal state with a metal structure is built, and the data transmission characteristic of a temperature sensor in the sealed container is verified. The data transition rate of 4.8 kbit/s is realized, which indicates that the proposed method has a high engineering value.

Key words: sealed metal structure; wireless data transmission; piezoelectric transducer; ultrasonic application; impedance modulation

0 引言

为获取密闭金属结构内部状态信息需要穿过金属壁进行数据传输^[1-2],由于电磁屏蔽作用,传统的电磁波在穿过金属壁时有衰减,这将降低数据传输的可靠性。另外,通过导线进行连接需要在金属壁上打孔,这种做法破坏了金属密闭结构的完整性,在一些特殊应用场合(如装有有毒气体的密闭容器),此法不安全,也不经济。超声波在固体中传输时衰减减小且能进行远距离传播,因此,采用超声波作为数据的载体及通信信号处理的方法能在不破坏金属壁

物理结构的前提下实现数据传输^[3-4]。

1 系统结构

过金属壁超声无线通信通道由一对分别位于金属壁两侧共轴的超声换能器组成,类似于一个三明治结构。上位机与微处理器通信控制直接数字频率合成器(DDS)信号源产生的高频载波经功率放大后与发送压电换能器相连,由逆压电效应引起声学振动,再通过金属壁将声学振动传递给另一侧的接收压电换能器,接收压电换能器通过正压电效应将接收到的声学振动转化为电能,即由外向内的一次数据传输。

收稿日期:2016-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375485,51305449)

作者简介:孙云哲(1990-),男,河南周口人,硕士生,主要从事状态监控技术的研究。通信作者:杨定新(1978-),男,江苏高淳人,副研究员,博士,主要从事状态监控与故障诊断、信号处理等研究。E-mail:yangdingxincn@163.com。

将内部传感器数据由内向外传输时与上述过程相反^[6]。过金属壁超声无线通信装置系统方框图如图1所示。

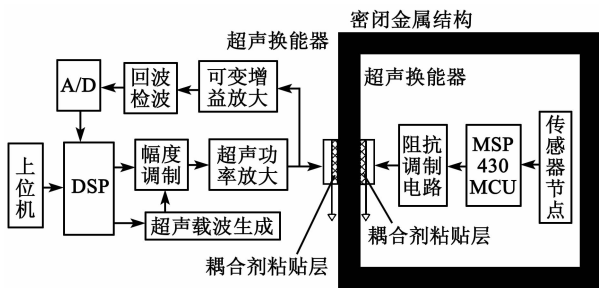


图1 系统结构方框图

图1中,数字信号处理器(DSP)产生超声信号源;功率放大器采用HP1171功率放大器,最大输出电压 $\pm 30\text{ V}$,用于放大由DDS信号源生成的超声频率信号;压电换能器采用材料为PZT5的圆形压电片,直径 $\varnothing 25.4\text{ mm}$;微控制器采用TI公司的MSP430系列微处理器(MCU),该系列MCU具有低功耗特性;阻抗调制电路通过调制内部电路的输入阻抗实现由内向外的信号发送。过金属壁超声数据传输系统实物图如图2所示。



图2 过金属壁数据传输系统实物图

2 基于双稳系统的数字脉冲信号增强传输模型

由过金属壁超声信号传输通道的脉冲响应可知,该通道具有多回波特性,在信号传输及数据通信中会造成回波干扰。图3为超声数据传输通道脉冲

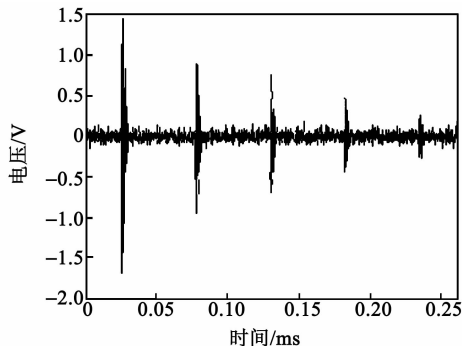


图3 过金属壁超声数据传输通道脉冲响应测试波形

响应测试波形。在高速通信中,为保证信号可靠、有效地通过金属壁进行传输,需要考虑采用信号均衡等方法克服通道中的回波影响^[6]。

对于周期及非周期数字脉冲信号的传输,与强噪声背景下正弦周期信号的检测有所不同。对于正弦周期信号的检测,主要是判断信号有无。在通信过程中,对于微弱数字脉冲信号的检测,事实上我们希望能强噪声背景下,经过随机共振系统处理后,能从输出信号中尽可能准确地恢复原始的数字脉冲信号,保证数字脉冲信号的有效传输。本文主要讨论二进制双极性数字脉冲信号的传输问题。

二进制脉冲信号的每个码元(比特)的持续时间 T_c 一般是固定的,单位时间内传输的码元数为码率(比特率)。一般情况下,我们知道数字脉冲信号发生的码率,周期脉冲码元排列是“0,1,0,1,...”有规律地周期变化。对于非周期脉冲信号,码元排列则没有这样的周期性,相邻两码元有可能相反。无论是周期脉冲还是非周期脉冲,最快的变化速度是一码元的持续时间,即由码率决定。因此,我们可将周期脉冲信号及非周期脉冲信号统一起来进行研究。

设 $s(t)$ 为数字脉冲信号序列, $\Gamma(t)$ 的均值为0,均方根为 σ 的高斯白噪声。两个信号的混合信号作用于以下非线性双稳动力学系统:

$$\tau_0 \dot{x}(t) = x(t) - x^3(t) + s(t) + \Gamma(t) \quad (1)$$

此模型与归一化双稳系统模型的不同在于引入了参数 τ_0 。 τ_0 为系统时间参数,反映系统响应的快慢,它与系统输出达到稳态所需时间成正比, τ_0 越小,系统响应越迅速,能处理变化越快的输入信号。式(1)实质上也表示一个质点受到正负随机电平与噪声共同作用时在势阱 $-\frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{4}x^4$ 中的运动。

原始的二进制数字脉冲信号 $s(t)$ 可写成以下形式:

$$s(t) = A \sum_{i=-\infty}^{+\infty} S_i P(t - iT_c) \quad (2)$$

式中: $A > 0$; S_i 为一独立分布的二进制随机序列, $S_i = \pm 1$, i 为整数。矩形脉冲

$$P(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0, T_c] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$s(t)$ 可看作由“0,1”数字序列转化而来,将二进制数字信号“0”映射成 $-A$,二进制数字信号“1”映射成 $+A$ 。每个码元在 $t = iT_c$ 时刻开始,持续时间

为 T_c 。

采用数值仿真法来研究数字脉冲信号的传输。将信号离散化,假设采样频率为 f_s ,步长 $h=1/f_s$ 。输入信号经采样后的信号为: $s(nh)+\Gamma(nh)$,其中 $n=1,2,\dots,N$, N 为采样点数。

因为输入信号在一个码元间隔内只有两种可能电平 A 或 $-A$,因此,将 $s(nh)+\Gamma(nh)$ 代入模型得到:

$$\tau_0 \dot{x}(t) = x(t) - x^3(t) \pm A + \Gamma(nh) \quad (4)$$

式中 $nh \leq t < (n+1)h$, $n=1,2,\dots,N$ 。

由于系统输出为模拟信号,通过下式将其恢复为数字脉冲序列:

$$y(t) = \text{sign}[x(t)] \quad (5)$$

在数字脉冲信号传输中常用误码率来表示信号传输的准确程度,这是反映数字信号传输质量的一个重要指标。另外,非线性系统本身也可看作数据传输通道,根据信息理论可用信道容量来描述系统的数据传输能力。

3 过金属壁双向数字通信

3.1 由外向内数据传输实验

当超声波从外部压电换能器发出,进入金属壁,到达内部金属壁与耦合层以及耦合层与内部接收换能器的交界时,一部分能量将被反射回去,绝大部分被内部的接收换能器吸收。反射能量与吸收能量的比值和换能器与金属壁间的阻抗匹配程度相关。反射波信号的振幅会随着内部压电换能器的声阻抗的改变而发生微小的变化,反射波穿过金属层一直传到外部,被安装在外部的压电换能器检测到。由外向内数据传输时,采用数字幅度调制,以连续波形式发送,调制速率为 2.4 kbit/s,外部发送端换能器信号及内部换能器信号如图 4 所示。图 4(a)、(b)的波形一致。内部换能器接收端接收到的信号幅值有所衰减,但可准确检测到外部调制信号,通过检波实现由外向内指令等数据的有效传输。

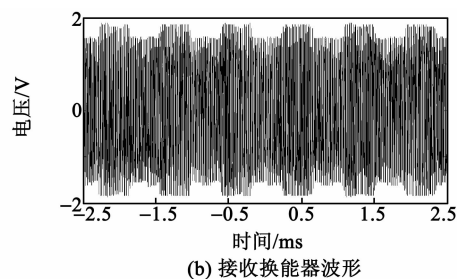
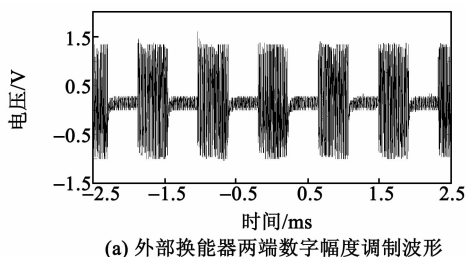


图 4 信号由外向内传输波形

3.2 由内向外数据传输实验

3.2.1 阻抗调制式通信原理

对于两对压电换能器的结构来说,由内到外的数据传输方式有多种选择,在满足传输速率和可靠性的前提下尽可能选择简便,能量消耗低的调制方式。因此,本文采用阻抗调制的方式^[7]。内部通过调制电阻抗从而引起声阻抗的变化,实现将内部状态检测传感器的数据信息通过阻抗调制方式传输到外部。

图 5 为内部阻抗调制的电路实现方式。数字化的传感器数据加载在 MOSFET 的 Gate 控制端,当传感器数据为‘1’时,MOSFET 导通,内部传感器接收端将通过电容与地连接导致电阻抗的变化,从而改变内部压电换能器的声阻抗;当传感器数据为‘0’时,MOSFET 截止,内部换能器经过倍压整流稳压模块后为负载提供电能。

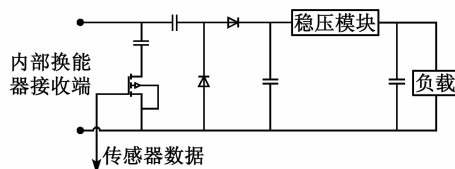


图 5 由内向外数据传输的阻抗调制实现方式

3.2.3 阻抗调制式通信实验

过金属壁由内向外传输温度传感器读数需要通信协议支持。在实验中模拟了串口的通信协议,通信速率设为 4.8 kbit/s,异步发送,一次发送两个字节,每个字节包括 1 位起始位、8 位数据位和 1 位停止位。在发送时低位在前,高位在后。外部 MCU 可向内部换能器发送传输命令,在收到启动温度监测命令 5A, A5, 50, 05 后,内部 MCU 读取温度传感器数据,并根据读取数据,通过调制内部转换器阻抗,实现数据发送。

由内向外进行数据传输时,采用阻抗调制式,超声波仍由外部的压电换能器产生,内部压电换能器

不产生超声波,这样减少了能量消耗。当需要由内向向外传输数据时,外部换能器不再对发送波形进行调制,即不再向内部发送命令,而是产生幅值固定的连续波。内部 MCU 控制阻抗调制电路,以某一调制速率对接收到的信号进行调制,内部接收换能器经调制后的波形以及此时外部换能器两端的信号如图 6 所示。图 6(b)与内部的调制数字信号有着准确的对应关系。

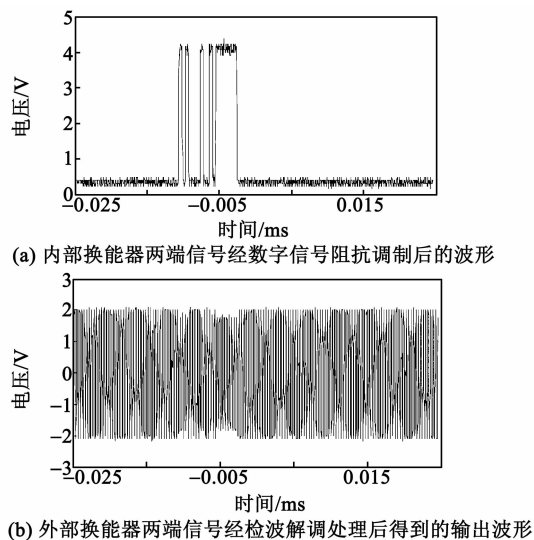


图 6 温度传感器数字信号传输波形

4 结束语

本文以密闭金属容器内、外双向数据传输的工程需求为背景,详细论述了利用超声波实现过金属壁无线数据传输的方法。设计、测试了由外向内、由内向内进行数据传输的过程,取得了良好的效果,满足工程实际需求,为状态监控与故障诊断技术提供了新思路、新手段。考虑到在进行数据传输过程中超声回声干扰将会引起较高误码率的问题,以及在密闭金属中为传感器供能较麻烦,可以尝试利用超

声波同时进行能量传输,这为后续研究提出了发展方向。

参考文献:

- [1] 李海廷, 杨涛. 超声波穿金属厚壁通信驱动系统的设计[J]. 压电与声光, 2013, 35(2):301-304.
LI Haiting, YANG Tao. Design of ultrasonic through-metal-thick-wall communication driving system[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(2):301-304.
- [2] ROA-PRADA S, SCARTON H A, SAULNIER G J, et al. An ultrasonic through-wall communication (UTWC) system model[J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2013, 135(1):48-65.
- [3] GRAHAM D J, NEASHAM J A, SHARIF B S. High bit rate communication through metallic structures using electromagnetic acoustic transducers[C]// Bremen, German: OCEANS 2009-EUROPE, IEEE, 2009:1-6.
- [4] WILT K R, LAWRY T J, SCARTON H A, et al. Mechanical design implications on power transfer through thick metallic barriers using piezoelectric transducers[C]//Vancouver, Canada: ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2010:173-182.
- [5] LAWRY T J, SAULNIER G J, ASHDOWN J D, et al. Penetration-free system for transmission of data and power through solid metal barriers[C]//Baltimore, America: Military Communications Conference, IEEE, 2011:389-395.
- [6] 李海廷. 穿金属厚壁超声通信信道辨识和均衡技术研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2013.
- [7] 王斌, 苟志平, 毛海燕. 基于 MCU 控制的高压开关电源[J]. 压电与声光, 2011, 33(1):64-67.
WANG Bin, GOU Zhiping, MAO Haiyan. A high-voltage switching power supply based on MCU control[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(1):64-67.