

基于改进 m 序列的压缩采样观测矩阵设计*

崔兴梅, 吴 键, 徐云鹏

(南京理工大学机械工程学院 南京, 210094)

摘要 为了降低对嵌入式系统数据采集的硬件要求,提出了一种适用于模拟信号采集系统的压缩采样方法,为压缩感知观测矩阵提供了一种低功耗硬件实现方法。介绍了观测矩阵设计的相关要求,并提出了带压缩采样矩阵的高斯随机观测矩阵及基于改进的 m 序列的压缩采样矩阵硬件实现方法。考虑系统功耗及外围电路复杂度问题,提出利用 MSP430 微处理器完成压缩采样系统设计,并利用滚珠丝杠动态测试中的振动信号完成对系统的验证。实验结果表明,该系统能以低于亚乃奎斯特采样频率的采样率对振动信号进行压缩采样,能较为精确地重构出原始信号。

关键词 观测矩阵;改进型 m 序列;滚珠丝杠振动信号;MSP430G2 微处理器;压缩采样

中图分类号 TP3

引 言

在许多嵌入式信号处理系统中,如何使用稀缺的物理资源来获得满意的性能是一个根本性的挑战。例如,分布式现场传感器需要有效地进行自主的数据采集和无线传输,但是在这个过程中会受到许多物理条件的限制,如覆盖范围、检测灵敏度及系统的鲁棒性等,这就需要对实际应用中的硬件系统降低要求。解决该问题的一个有效方法是减少采集和处理一些不必要的或者多余的数据。传统的传感技术采集的数据总量远远超过所需的数据量,在大多数情况下,往往只有小部分数据是实际有用的,其余的都不会对处理结果造成影响,可以被丢弃。因此,文献[1-2]提出了压缩感知(compressed sensing, 简称 CS)理论。

压缩感知的基础理论研究主要包括稀疏变换基的选择、观测矩阵的设计与实现及信号重构算法研究等^[1]。其中,压缩感知的观测过程是对稀疏信号的线性非自适应性测量,这是一个高维稀疏向量降维的过程,也是一个计算完备的信号稀疏系数向量的过程。如今,压缩感知理论没有在更广阔领域得

到应用,主要原因就在于压缩感知的观测过程难以在硬件电路中得到实现,从而难以应用于实际工程之中。

在将压缩感知理论应用于模拟信号采集的研究中,文献[3-4]提出了一种应用模拟信息转换器(analog-to-information conversion, 简称 AIC)实现压缩采样的方法,该转换器使用积分器或低通滤波器完成对信号的调制,即压缩采样,在后续处理中实现对数据的重构。文献[5-6]针对模拟信息转换器做出了研究,提出了改进的模拟信息转换器硬件实现方案。由于模拟信息转换器在对信号调制(压缩采样)时,所需积分支路由所需信息采样点数决定,因此需要大量的积分器或低通滤波器电路,在硬件上难以实现。

笔者首先介绍了观测矩阵需要满足的有限等距约束(restricted isometry property, 简称 RIP)准则,设计了用于硬件微处理器实现的观测矩阵方案,并对其观测性能参数做出了分析与计算;其次,设计了利用改进的 m 序列产生随机采样序列的方法,并利用数字电路和微处理器实现对一般的连续模拟信号的压缩采样;最后,利用滚珠丝杠动态测试中的振动信号完成对系统的实验验证。

* 国家自然科学基金资助项目(51105209, 61401211, 51175267);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(30915118804);江苏省高校自然科学研究重点资助项目(15KJA460004);高等学校学科创新引智计划资助项目(B16025);航空科学基金资助项目(20161959001)

收稿日期:2016-02-29;修回日期:2016-06-07

换基相干性参数的分布统计直方图,如图 1 所示。

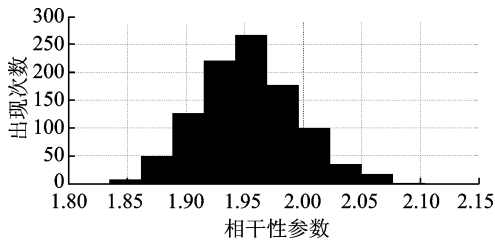


图 1 相干性参数分布

Fig. 1 Coherence parameter distribution

由图 1 可知,由于压缩采样矩阵和高斯矩阵都带有随机性,其相干性参数的范围为 1.85~2.15,其较大概率出现在 1.95 左右,均远远小于 $\sqrt{n} = \sqrt{512} = 22.6274$,故该矩阵与离散傅里叶变换基有较大的不相干性,满足观测矩阵的不相干性条件,能够实现较精确的信号重构。

压缩感知中传感矩阵应满足有限等距约束性(RIP)的条件, K 阶 RIP 条件要求参数 $\xi_k \in (0,1)$ 。有限等距常数(RIC)是与有限等距约束紧密结合在一起的一个参数,具体是指满足有限等距约束性的最小 ξ_k ,该常数可以根据传感矩阵的特征值 λ 计算。

矩阵 A 满足 K 阶 RIP 性质的充要条件为矩阵 A 中任意抽取 K 列的子矩阵 A_T 构成的格拉姆矩阵 $G(A_T) = A_T^H A_T$ 的所有特征值均位于 $[1 - \xi_k, 1 + \xi_k]$ 范围内。根据此定理,可设计 Matlab 代码计算等距约束常数。

同样令 $m=80, n=512$,选取离散傅里叶变换基为稀疏矩阵,根据上述原理计算,其等距约束常数为 0.7120,基本满足 $\xi_k \in (0,1)$ 的要求。

2 基于改进 m 序列的压缩采样矩阵的实现

2.1 m 序列的产生及性质

m 序列又称伪随机序列,它的特点是不能预先确定但是可以重复产生, m 序列具有平衡特性、游程特性和移位相加特性^[10]。在其平衡特性中,在一个 m 序列的每个周期中,“1”码元出现的次数总比“0”码元多一个,两种码元数量基本相当。但是,在笔者所设计的模拟信号采集系统中采样点数要远远小于信号长度,因此, m 序列并不适合做压缩采样的随机序列。鉴于此,一种改进的 m 序列被设计用作压缩采样的随机序列。

为了使压缩采样中的测量点数远小于信号长度,改进的 m 序列中,“0”出现的次数应远大于“1”的数量。因此,应在 m 序列发生器电路中增加一个双稳态电路和一个与门, m 序列发生器的输出与双稳态电路输出做“与”运算后将结果输出到微处理器引脚,其中, m 序列发生器生成的序列触发双稳态电路状态的翻转。逻辑转换过程由表 1 给出。

由表 1 可以看出,经过处理的 m 序列中“1”的个数减少为 1/4,基本满足压缩采样点数的要求,可以用作随机采样序列。

表 1 改进的 m 序列发生器逻辑转换表

Tab. 1 Logic conversion table of improved m sequence

m 序列发生器输出	双稳态电路现态	“与”运算后输出	双稳态电路次态
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

2.2 改进的 m 随机序列的电路实现

通常 m 序列发生器由 N 级反馈移位寄存器构成^[10]。本研究中设计了 8 级 m 序列发生器,配合双稳态电路与“与”门,输出随机采样序列。移位寄存器芯片选择双向 4 位移位寄存器 74LS194。双稳态电路由 4013 双 D 触发器芯片构成。电路如图 2 所示。

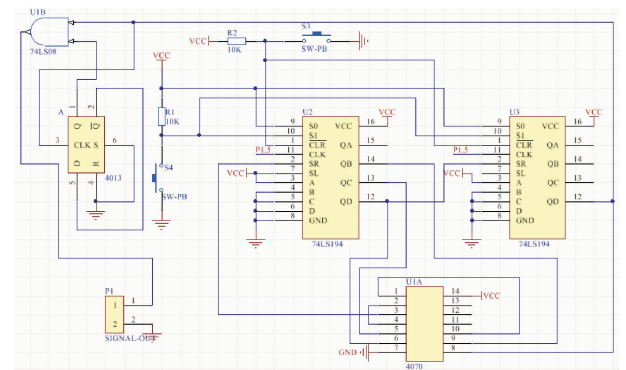


图 2 改进的 m 序列发生器

Fig. 2 The improved m sequence generator

3 压缩采样系统的硬软件设计

3.1 设计需求分析及微处理器选型

一般地,模拟信号采样系统需要完成信号的 AD 转换、传输及处理^[11-13]。笔者所设计的压缩采

样系统主要是为了解决嵌入式系统中物理资源缺乏、功耗受限的问题,为了减小系统功耗,降低对硬件系统物理资源的要求,应当尽量减少系统外围电路的规模。因此,微处理器上应集成以下模块,包括片上 AD/DA 转换(用于信号采集)、定时器模块(用于计数)以及 UART 模块(用于采样完成后传输数据到 Matlab)。同时,微处理器本身也应具备低功耗特性。

笔者最终选取 MSP430G2 型微处理器,因为该处理器具有内置的 10 位 AD 转换器、2 个内部定时器模块和 UART 模块,基本符合系统设计的要求,可以实现低功耗、低成本的“单片”解决方案。与 ARM 和 FPGA 相比,该型微处理器具有多达 5 种低功耗模式,可以在超低功耗下运行。因此,笔者基于 MSP430G2553 型微处理器进行压缩采样系统设计,编译工具使用 CCS,编程语言采用 C 语言。

3.2 压缩采样系统软件设计

压缩采样系统软件开发流程如下。

1) 微处理器初始化,包括关看门狗,配置时钟信号为 SMCLK(辅助主时钟)。

2) 设置定时器定时时间,该时间为改进的 m 序列码元产生的时间间隔。此时定时器开始计时,系统进入低功耗模式 LPM1,等待唤醒。

3) 定时时间到,微处理器唤醒,重装定时器初值,同时检测改进的 m 序列输入引脚状态。将检测结果通过 UART 发送至上位机,若状态为“1”,启动 ADC10 模块进行一次采样,将数据通过 UART 模块发送到上位机;若状态为“0”,则发送数据 0 到上位机。

具体流程图如图 3 所示。

4 压缩采样系统实验验证

笔者采用滚珠丝杠动态测试中的振动信号对系统的可行性进行验证^[14],实验装置如图 4 所示。其中,实验信号为 200~600Hz 的振动信号,由激振器产生。使用加速度传感器完成数据采集,从而对滚珠丝杠的模态等相关参数进行计算^[15-16]。

本实验将利用所设计系统完成对滚珠丝杠振动信号的压缩采样,选取子空间追踪算法(SP)完成对信号的重构。图 5 为模拟信号采集系统的压缩采样过程及后续上位机重构流程。

为了保证精确采集到信号,MSP430 采样频率设置为 3kHz,改进的 m 序列采集信号长度为 512

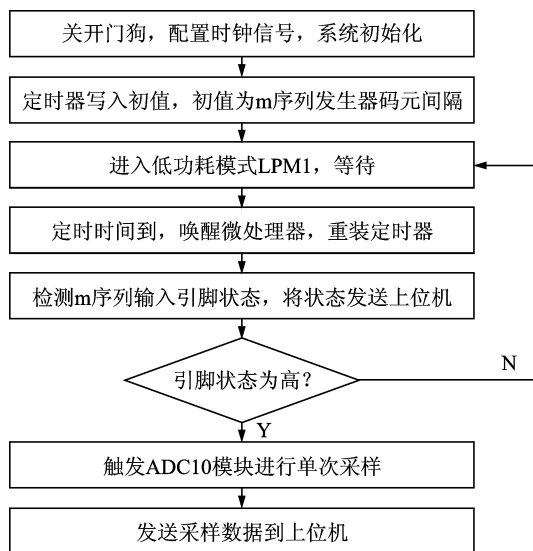


图 3 系统软件流程图

Fig. 3 The flow chart of system software

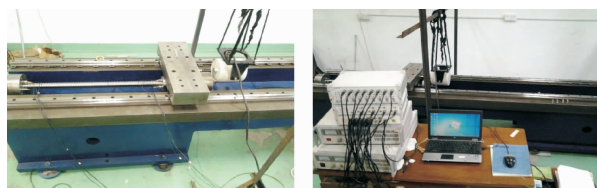


图 4 滚珠丝杠动态测试系统

Fig. 4 The ball screw dynamic testing system

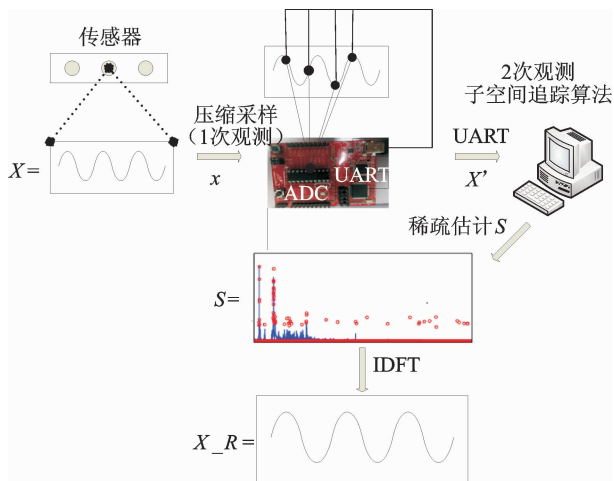


图 5 模拟信号采集系统工作流程

Fig. 5 The working process of imulation signal acquisition system

点时,实际采样点数为 120 点左右,因此系统的实际平均采样率约为 $f = 3 \times \frac{120}{512} \text{kHz} \approx 703 \text{Hz}$ 。

其对比实验结果如图 6、图 7 所示。

压缩采样过程中信号稀疏度未知,如果信号稀疏度估计存在较大误差,SP 算法重构精度会受到很

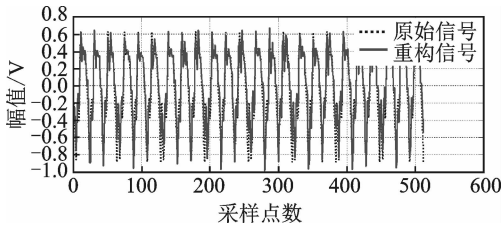


图 6 压缩采样系统重构振动信号

Fig. 6 The reconstruction vibration signal of compressed sampling system

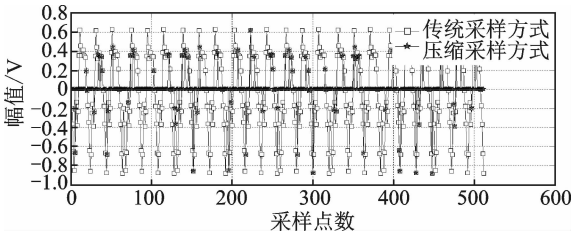


图 7 传统采样与压缩采样点数对比

Fig. 7 The points comparison of traditional sampling and compression sampling

大的影响。在稀疏度为 10 的情况下残余误差不一定是最小的。因此,对于观测的 120 个采样点,在稀疏度从 0 到 50 的情况下,在各种稀疏度下均重构 1 000 次,得到 2 组实验信号的重构残余误差和重构时间与稀疏度的关系,如图 8 所示。

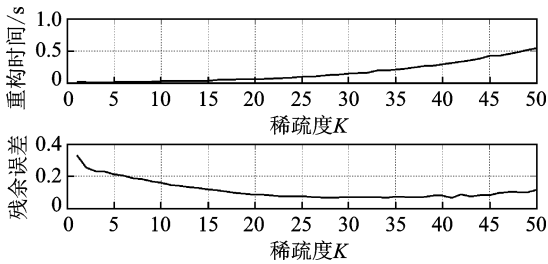


图 8 不同稀疏度下信号的重构时间与残余误差

Fig. 8 The reconstruction time and residual error of signal on different sparsity

通过计算,在最适应稀疏度下与传统采样方法相比,基于改进 m 序列的压缩采样系统重构残余误差为 0.0560,可以较为精确地完成原始信号的重构。

5 结束语

提出了一种基于压缩感知理论的模拟信号采集方法,为压缩感知观测矩阵提供了一种低功耗硬件实现方法,实现了硬件压缩采样过程。该方法突破了压缩感知理论仿真研究的局限性,降低了对硬件

数据采集系统的要求,具有一定的实用价值。为验证系统的实用性,利用滚珠丝杠动态测试中的振动信号完成了对系统的验证。实验结果表明,该系统能够以低于乃奎斯特频率的采样率实现对相关信号的压缩采样,并根据采样数据较精确的恢复出原始信号。

参 考 文 献

- [1] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles; exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [3] Kirolos S, Laska J, Wakin M, et al. Analog-to-information conversion via random demodulation [C] // IEEE Dallas/CAS Workshop on Design, Applications, Integration and Software. Richardson TX: [s. n.], 2006: 71-74.
- [4] Laska J N, Kirolos S, Duarte M F, et al. Theory and implementation of an analog-to-information converter using random demodulation [C] // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. New Orleans, LA: [s. n.], 2007: 1959-1962.
- [5] 陈宇科. 压缩采样中的模拟信息转换技术研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2011.
- [6] 刘立明. 模拟信息转换器的实现技术研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2012.
- [7] Candes E J, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections; universal encoding strategies [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [8] Qaisar S, Bilal R M, Iqbal W, et al. Compressive sensing; from theory to applications, a survey [J]. Journal of Communications and Networks, 2013, 15(5): 443-456.
- [9] 路畅, 刘玉红. 压缩感知理论中的 RIP 准则[J]. 自动化与仪器仪表, 2015(8): 211-213. Lu Chang, Liu Yuhong. RIP criterion in compressed sensing theory [J]. Automation and Instrumentation, 2015(8):211-213. (in Chinese)
- [10] 党骥, 马林华, 田雨, 等. m 序列压缩感知测量矩阵构造[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2015, 42(2):186-192. Dang Kui, Ma Linhua, Tian Yu, et al. Construction of the compressive sensing measurement matrix based

- on m sequence [J]. Journal of Xian University: Natural Science Edition, 2015, 42(2):186-192. (in Chinese)
- [11] 尚盈, 袁慎芳, 吴键, 等. 基于无线传感网络的大型结构健康监测系统[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(2):254-258.
Shang Ying, Yuan Shenfang, Wu Jian, et al. Large-scale structural health monitoring system based on wireless sensor networks [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(2):254-258. (in Chinese)
- [12] Yuan Shenfang, Mei Hanfei, Qiu Lei, et al. On a digital wireless impact-monitoring network for large-scale composite structures [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(8):1-16.
- [13] 杨世锡, 梁文军, 于保华. 振动信号多通道同步整周期数据采集卡设计[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1):23-28.
Yang Shixi, Liang Wenjun, Yu Baohua. Vibration signal multi-channel synchronous whole-cycle data acquisition card design [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1):23-28. (in Chinese)
- [14] 李学军, 侯彦涛, 何宽芳, 等. 集成式多功能振动信号测试系统的研制[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2):143-146.
Li Xuejun, Hou Yntao, He Kuanfang, et al. The development of the integrated multi-functional vibration signal test system [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2):143-146. (in Chinese)
- [15] 何博侠, 董香龙, 程寓, 等. 滚珠丝杠动态特性参数的测试装置: 中国, CN203178071U[P]. 2013-09-04.
- [16] 翁健光, 袁军堂, 汪振华, 等. 滚珠丝杠副静力学特性分析[J]. 制造技术与机床, 2012(11):127-130.
Weng Jianguang, Yuan Juntang, Wang Zhenhua, et al. Analysis on statics characteristic of ball screw [J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2012(11):127-130. (in Chinese)



第一作者简介: 崔兴梅, 女, 1992年2月生, 硕士生。主要研究方向为结构健康监测、无线传感器网络。曾发表《A novel RFID-based sensing method for low-cost bolt loosening monitoring》(《Sensors》2016, Vol. 16, No. 2) 等论文。

E-mail: 114101000159@njust.edu.cn

通信作者简介: 吴键, 男, 1979年11月生, 副教授。主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail: wuj@njust.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管, 南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办, 是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献, 包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等, 不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊, 双月刊, 每逢双月末出版, 每本定价 30 元, 全年 180 元。欢迎订阅和投稿, 欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址: 南京市御道街 29 号 邮政编码: 210016

电话: (025)84893332

传真: (025)84893332 E-mail: qchen@nuaa.edu.cn

网址: <http://zdc.nuaa.edu.cn>