

The Design on Data Hard Recovery System of MEMS Micro Inertial Measurement Unit Used in Spinning Projectiles*

ZHAO Yi¹, LI Jie^{1,2*}, LIU Zhe¹, LIU Jun^{1,2}, CHEN Wei³

(1. North University of China Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China;

3. Shanxi North Hui Feng Mechanical & Electronic Co. Ltd NO. 2 Academic Institution, Changzhi Shanxi 046012, China)

Abstract: To improve the problem traditional recorder in ammunition can not work reliably in harsh launch environment such as high temperature, high pressure and high overload or can not be installed for the limitations with narrow dimensions of the missile body, this paper proposes a novel design method of data hard recovery system for MEMS inertial measurement unit. Using digital signal processor to control high-speed analog-digital conversion chip, the system converts analog output of MEMS inertial devices to digital quantity and stores them in FLASH memory. Through recording and displaying range experimental data, the system can completely record the flight parameter data of the missile body. With a number of advantages such as miniaturization, anti-high overload, high sampling rate and low output noise, the system is valuable for engineering implementation in dynamic measurement for location and attitude information of conventional ammunition's launch, flight and the whole process of touchdown.

Key words: spinning projectile; MIMU; A/D conversion; data storage

EEACC:7120;7210G

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2012.09.015

旋转弹用 MEMS 惯性测量组合数据硬回收系统设计*

赵 诣¹, 李 杰^{1,2*}, 刘 喆¹, 刘 俊^{1,2}, 陈 伟³

(1. 中北大学电子测试技术国防科技重点实验室, 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点

实验室, 太原 030051; 3. 山西北方惠丰机电有限公司科研设计二所, 山西 长治 046012)

摘 要: 针对常规弹药在高温、高压、高过载等恶劣发射环境和弹体狭窄尺寸限制下, 传统的弹载数据记录器无法可靠工作并无法安装等问题, 提出了一种新型的适用于 MEMS 惯性测量组合数据硬回收系统的设计方法。该系统采用数字信号处理器控制高速模数转换芯片, 将采集到的 MEMS 惯性器件输出模拟量转化为数字量后存入 FLASH 存储器中, 实现对弹体整个飞行过程中相关飞行参量的准确记录。通过对某次靶场实验数据记录和显示, 该系统能够完整地记录弹体飞行过程中的参量数据, 具有小型化、抗高过载、采样率高、噪声输出小等优点, 对常规弹药发射、飞行以及着地全过程的姿态、位置信息的动态测量有一定的工程应用价值。

关键词: 旋转弹; MIMU; A/D 转换; 数据存储

中图分类号: TJ760.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)09-1251-06

常规弹体飞行姿态的精确测量具有重要的科学价值和实际意义^[1]。对于旋转弹体, 其飞行姿态、位置、速度等相关参数的准确测试, 是考核评定这类武器系统性能和战绩指标的重要内容, 它不仅可以为评定旋转弹准确度、机动性和抗干扰能力等主要性能指标提供决策依据, 而且是进行故障分析与诊断的可靠

资料^[2]。同时, 弹体飞行参数还能被用于弹体的弹道修正与控制, 对其制导化意义重大。但常规弹体的发射环境通常较为恶劣, 同时由于狭窄弹体的限制, 使得对飞行参数的动态测量较为困难^[3-6]。

基于 MEMS 的惯性测量系统以自主性强、可靠性高、体积小、成本低、抗高过载、环境适应性强, 以

及易于安装和维护等一系列优势,被认为是弹体飞行参数动态测量的首选方案,它可以提供被测载体运动的实时姿态、位置和速度等各种惯性参数^[7-8]。MEMS 惯性测试系统在空间狭窄、环境恶劣、飞行时间较短的旋转弹飞行参数测试中,被国内外普遍认为是不可或缺的重要测试组件。因此,对 MEMS 惯性测量系统数据的准确记录并回收对分析弹体的整个飞行过程具有重要的意义^[9]。

本文针对 MEMS 惯性测量组合数据回收系统的设计要求,在介绍整个系统工作原理的基础上,对微型惯性测量组合的组成及输出信息特点作了详细介绍,之后从系统硬件设计和软件设计两个方面对系统进行了具体说明,最后给出了某型号炮弹靶场试验数据的存储和分析结果。

1 系统工作原理

系统的总体组成如图 1 所示,主要由微惯性测量单元和数据采集存储系统两大部分组成。

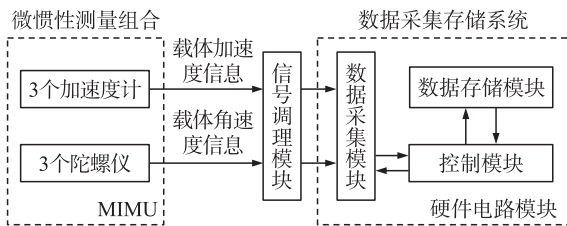


图 1 系统总体组成原理框图

图 1 中,微型惯性测量单元部分实时输出其敏感到的载体加速度信息和角速度信息,对于 MEMS 惯性器件,其输出为模拟电压值。数据采集存储系统部分实现将采集到的六路模拟电压值转换为数字量,并通过相应的编码方式将转化后的数字量按照固定帧格式存入 FLASH 存储器中,为后续的数据分离和处理做准备。

1.1 微型惯性测量组合

微型惯性测量单元 MIMU (Micro Inertial Measurement Unit) 主要由敏感表头和专用电路组成。图 2 是 MIMU 敏感表头的组合示意图,采用 3 个正交的微型加速度计和 3 个正交的微型陀螺仪进行二次集成构成一个正交三轴组合测量系统,分别测量沿这 3 个方向的加速度及角速度^[10],再通过坐标变换矩阵就可以得到被测载体的姿态角信息,速度和位移。

基于 MEMS 的惯性器件以自主性强、可靠性高、体积小、重量轻、成本低、抗高过载、环境适应性强等一系列优点,被选作 MIMU 中敏感加速度和角速度的传感器,通过微系统的集成与相关试验的测试,就可以得到试验中使用的 MIMU。

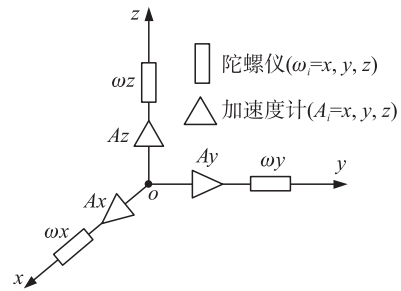


图 2 MIMU 表头示意图

图 3 所示的是实际实验过程中使用 MIMU,它已经集成了 3 个 MEMS 加速度计、3 个 MEMS 陀螺仪和信号调理电路。通过接插件的连接就可以输出相关电压值。

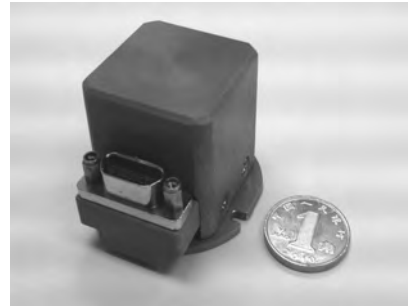


图 3 MIMU 实物图

2 系统硬件设计

系统的硬件部分主要分为 3 个模块:核心微控制器模块,AD 采样电路模块,FLASH 数据存储模块。

2.1 核心微控制器模块

选用的控制器为 TI 公司生产的 32 bit 定点 DSP 控制器 TMS320F2812,它不但具有传统微处理器可编程、灵活性强、集成度高等良好性能,而且其内核频率最高为 150 MHz,时钟周期 6.67 ns。采用改进的哈佛结构使其运算的速度、精度和处理能力大幅度提高,同时最多可有 56 个可编程通用输入/输出 (GPIO) 引脚,可方便数据线和控制线的设置,特别适用于数据线和控制线较多的芯片。使用其作为模数转换和 FLASH 存储器的控制器,其高速的数据处理速度与控制速度可以满足系统高采样率和处理速度的要求^[11]。

2.2 A/D 采样电路模块

准确地将 MIMU 的输出模拟电压值转换为数字量是本设计中非常关键的部分,在很大程度上决定了整个系统的测量精度。数据采集模块采用 A/D 转换将 MIMU 的模拟输出转换为数字量。本设计为提高模数转换速度与转换精度,选用 TI 公司的 16

bit 6 通道高速同步模数转换芯片 ADS8365,该模数转换芯片在 5 MHz 时钟频率下工作时,能够达到的最高采样率为 250 kHz,如此高的采样率可以满足系统对实时性的要求。

DSP 控制器 TMS320F2812 最多可有 56 个可编程通用输入/输出(GPIO)引脚,设计人员可以根据硬件电路上的连接灵活地设置控制线和数据线,方便相关寄存器的设置。其中,GPIOA0-GPIOA15 被

设置为数据线,与 ADS8365 的 DO0-DO15 相连接;GPIOB 中除 GPIOB0、GPIOB6、GPIOB7、GPIOB15 外,都作为 ADS8365 控制线,与模数转换芯片的相关控制管脚相连接,通过程序中对相关管脚电平的设置来为模数转换芯片提供控制信号,实现控制模数转换和数据读取。根据实际的应用情况,本设计的采样率设置为 5 kHz。数据采集系统的硬件电路如图 4 所示。

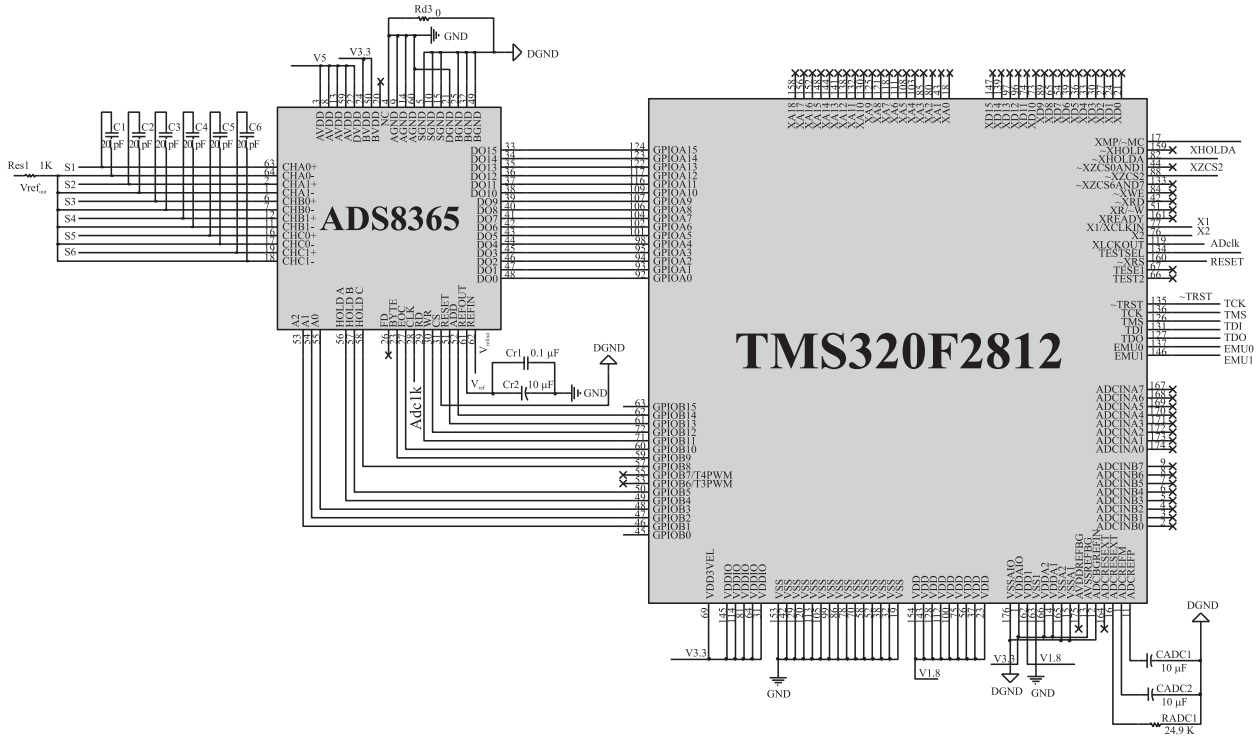


图 4 数据采集系统电路图

2.3 FLASH 数据存储模块

本设计存储器选用三星公司的 K9K8G08U0M,此存储器具有大容量、高可靠性、耐振动、不挥发、功耗低、可快速电擦写、寻址简单的特点,是一种采用 NAND 结构的 Flash 存储芯片,掉电后数据不会丢失,并可保证数据保存 10 年而不丢失。同时可靠的 CMOS 移动门技术使得芯片能实现 100 K 次写/擦除操作。其单片容量高达 1 G,同时还提供有 32 M 额外容量。K9K8G08U0M 大容量闪存芯片的 I/O 口是 8 bit 通用数据地址线,既可以作为地址的输入端,也可以作为数据的输入/输出端,同时还可以作为指令的输入端^[12]。芯片上的写控制器能自动控制所有写和擦除操作,包括提供必要的重复脉冲、内部确认和数据空间。图 5 是 F2812 对 K9K8G08U0M 的写数据时序。

K9K8G08U0M 的寻址需要 5 个地址周期,其中,前 2 个周期地址是列地址,用于寻址页内 2 112 byte,后 3 个周期地址是行地址,用于寻址芯片的页地址。K9K8G08U0M 内包含了一个状态寄存器,向命令寄

存器写入 70 h 命令后,可以将状态寄存器的内容输出到 I/O 管脚上。可以通过读 I/O 管脚电平来判断写/擦除操作是否成功:低电平代表成功,高电平代表失败^[13]。

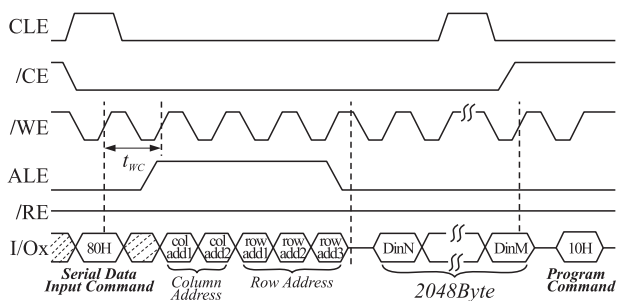


图 5 F2812 对 K9K8G08U0M 的写数据时序

微控制器对 K9K8G08U0M 的操作从擦除命令开始,系统上电后,通过相关控制线的设置和对相关端口状态的检测,完成对 K9K8G08U0M 的擦除,保证存储器中的数据是本次写入操作写入的数据。对于擦除不成功的块,记录其坏块地址。系统每写完一页

后,判断下一页的地址是否为坏块,如果为坏块,则直接跳过,继续判断;如果不是坏块,则将数据写入^[14]。

在将数据写入 FLASH 实际过程中,每当写完一页,需检测 I/O6 和 I/O0 的状态,当 I/O6 变为高电平、I/O0 变为低电平后在进行下一页数据的写入,否则数据写入几页后将停止写入操作,造成记录数据的丢失,这一点在实际的应用过程中很重要。

3 系统软件设计

系统的软件设计部分主要分为两个方面:控制 AD 转换和控制转换后的数据按固定帧格式写入 FLASH 中。

核心微控制器通过对 3 个 HOLD 信号电平的拉高拉低,设置对 6 个通道模数转换地控制;当模数转换结束检测到 EOC 信号的变化后,将转换得到的数字量按照通道标号读入控制器中,之后控制器按照预先设定的编码方式以固定帧格式将采集到的数据写入 FLASH 存储器中,完成一次数据的写入。其软件流程图如图 6 所示。

微惯性测量组合输出六路模拟信号,如何使转化后的数据按照一定顺序存入 FLASH 中并能被有效读出显得尤为重要。为了既能使数据按照固定的格式存入存储器中,又能检测存储的数据是否有丢失,同时又能便于数据的读取和分离,将采集并转化后的 6

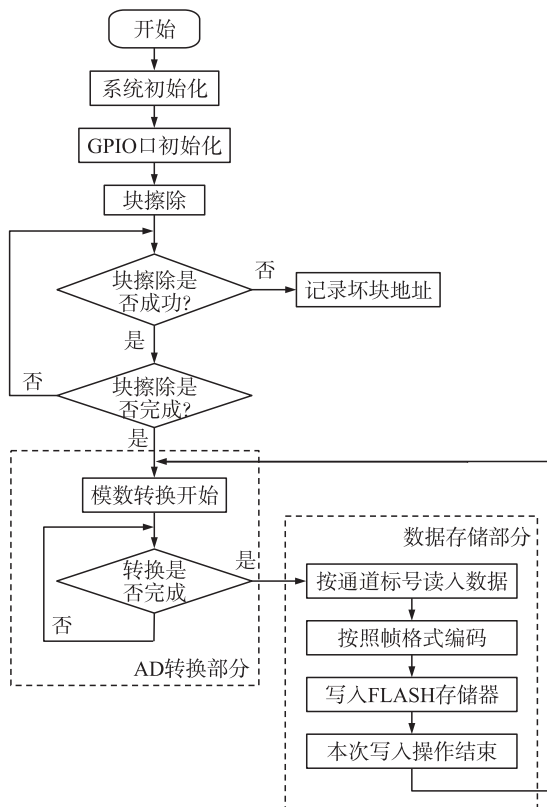


图 6 系统软件设计流程图

路数字量按一定的编码方式制定成固定帧格式后进行存储。在读取原始数据后,只要去掉帧格式中的相关信息位就能分离得到对应通道号的数字量,即得到 6 路传感器的输出模拟量对应的数字量。

为此,系统定义了数据的帧格式,其组成如图 7 所示。

字节	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
数据	EB	EB	00	00	6C	81	A1	EA	96	26	ED	A5	E5	D1	B1	41	22	C2	E2	24	D7	47	1A

图 7 数据格式定义

其中:01,02 为帧头,程序利用帧头识别数据帧开始;03~05 是由硬件生成的帧计数,由此帧计数可以直观地看出存储的数据是否有丢失。如果帧计数连续增加,中间没有间断,证明数据没有丢失;06,09,12,15,18,21 6 byte 为通道标号,每个通道标号后的 2 byte 存储的是经过模数转化后模拟量对应的 16 bit 二进制的数字量,前 3 个通道为加速度计的数据,后 3 个通道为陀螺仪的数据。在数据分离时,只要去掉每一帧数据的帧头、帧计数、通道标号就能得到对应通道号的数据。

程序从硬件得到的数据以十六进制的帧格式存在,不能直接使用,所以在进行数据运算之前,首先要对数据进行处理。下面以第一通道加速度计数据(06~08 byte)为例,首先把这 3 个有效字节分别命名为 Byte1、Byte2 和 Byte3。

当 Byte2>128 时:

$$Data = \frac{[(Byte3 - 128) \times 256 + Byte2]}{65536} \times 5 \quad (1)$$

当 Byte2<128 时:

$$Data = \frac{[(Byte3 + 128) \times 256 + Byte2]}{65536} \times 5 \quad (2)$$

通过上面的数据处理公式,就可以完成数据分离得到实际的模拟电压值。

4 抗高过载设计

4.1 灌封工艺

常规弹体的发射瞬间的高过载,会使整个系统受到很大的应力。如果不添加相应的防护措施,整个电路会遭到应力波的破坏,导致电路板的断裂、电路芯片损坏、电路板焊点脱落、导线被拉断和电池掉电等一系列问题,最终导致实验的失败^[15]。为提高电路系统的抗高过载能力,需要将整个系统进行灌封,以此来提高系统的抗冲击、抗高过载能力。在实际使用过程中,MIMU 和数据回收系统都是安装在具有一定强度的机械结构中。根据以往的试验经验,灌封材料选用聚氨酯。聚氨酯具有调配简单,凝固快,强度高,

弹性大等优点。将电池和相关电路板进行固体灌封,聚氨酯凝固后强度很高,但同时又有一定的弹性,在高过载的情况下能起到很好的缓冲和减震作用,能大大减小在弹药在发射瞬间和着地过程的应力波,保护整个系统不被损坏,提高了系统的可靠性。

4.2 缓冲设计

在对电池和相关电路板进行灌封后,为降低系统所放置的机械结构与弹体之间的冲击,减少外力对系统产生损坏作用,必须在弹体和系统安放的机械结构之间加装缓冲材料,利用缓冲体的弹性变形和阻尼作用,减弱由于载体的加速和减速运动而作用于回收系统的动量,其目的就是把冲击能量转换为缓冲材料的变形能量,使最大负荷降低,保护电路^[16]。通过大量试验表明,适当厚度的泡沫铝和毛毡作为缓冲材料具有良好的缓冲效果,可有效减小弹体对整个系统的冲击。

5 实验验证

为验证系统的可靠性和回收数据的准确性,将研制的整个数据硬回收系统用于某型炮弹飞行过程中相关飞行参量测试记录的靶场试验中,对某型炮弹的靶场试验数据进行分析。通过对实验数据的回收读取,首先分析了原始数据的正确性,确定了原始数据没有丢帧现象。读取的部分原始数据如图 8 所示。

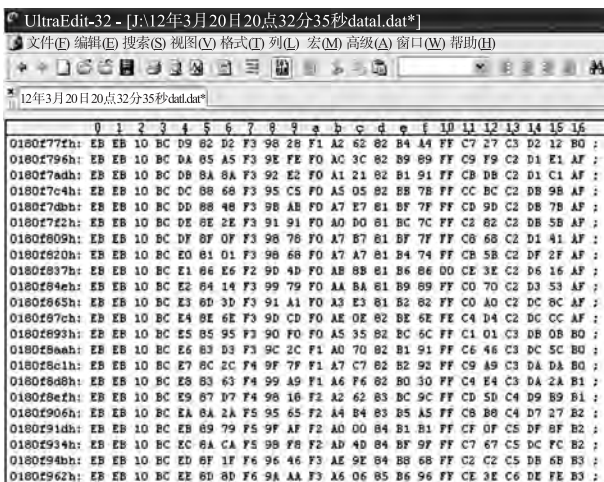


图 8 部分原始数据

由图 8 可以看出,在地址连续的前提下,帧计数连续增大,由 10 BC D9 递增到 10 BC EE,没有出现丢帧的现象,证明系统对数据回收的可靠性。

然后将原始数据分离,通过 MATLAB 软件可以绘制出采样点与 MIMU 输出信息关系的曲线。此处以其中一路陀螺仪的数据为例。由系统直接采集到的数据噪声较大,大约为 18 mV,这样的数据代入解

算程序后会造成解算误差较大,所以在解算之前,先要对数据进行滤波^[17]。根据 MIMU 惯性器件的实际情况,选用八阶巴特沃斯低通滤波器,截止频率为 50 Hz。滤波前后的数据噪声对比如图 9 所示。其中蓝色为原始数据,红色为滤波后的数据。由滤波后的数据可以看出,滤波后的数据噪声约为 6 mV,可以满足解算对精度的要求。

最后用滤波后的数据,通过相关解算算法,绘制出弹体飞行过程中的姿态信息,如图 10 所示。

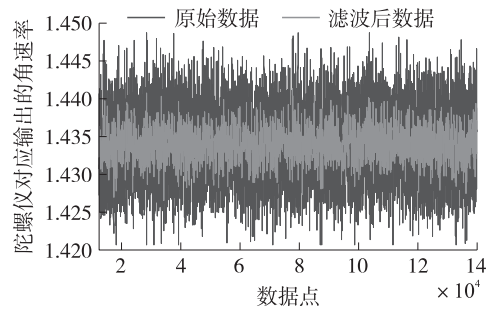


图 9 滤波前后数据噪声对比

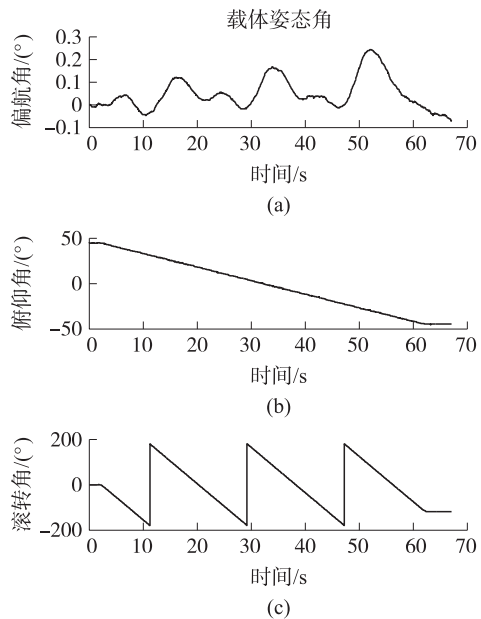


图 10 弹体飞行过程中的姿态信息

由硬回收系统回收数据绘制的弹体姿态信息曲线可以看出,系统能够完整地记录弹体在飞行过程中的姿态信息,并能准确的反映弹体在飞行过程姿态的变化。

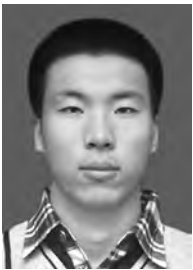
6 结束语

本文研制的系统能完整地将微型惯性测量组合输出的信息准确地存储到 FLASH 存储器中,较好地解决了传统弹载数据记录器无法可靠工作并无法安装等问题,实现了对旋转弹体飞行姿态相关信息数据的回收。通过对回收数据的分析处理,系统存储的数

据能够完整地记录弹体在飞行过程中的姿态信息,并能准确的反映弹体在飞行过程姿态的变化。该系统可广泛应用于旋转弹飞行姿态的测量以及导航和制导方向,对实验过程中弹体飞行姿态、位置、速度等相关参数的准确分析具有重要的意义,具有较高的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 张成,杨树兴.一种滚转导弹飞行姿态的获取方法[J].北京理工大学学报,2004,24(6):481-485.
- [2] 贾正望,郭治.高速旋转弹的姿态控制系统设计[J].火炮发射与控制学报,2011,3:88-91.
- [3] Kevin King, Yoon S W, Perkins N C, et al. Wireless MEMS Inertial Sensor System for Golf Swing Dynamics[J]. Sensors and Actuators, 2008, (141):619-630.
- [4] David Jurman, Marko Jankovec, Roman Kamnik, et al. Calibration and Data Fusion Solution for the Miniature Attitude and Heading Reference System[J]. Sensors and Actuators, 2007, (138):411-420.
- [5] 史金光,韩艳,刘世平,等.制导炮弹飞行姿态角的一种组合测量方法[J].弹道学报,2011,23(3):37-42.
- [6] 刘志德,王勇,陈家斌,等.智能炮弹姿态测量新方法[J].计算机仿真,2010,27(6):49-52.
- [7] 李杰,洪惠惠,张文栋. MEMS 微惯性测量组合标定技术研究[J].传感技术学报,2008,21(7):1169-1173.
- [8] 岳凤英,高松山. MEMS 惯性测量组合在无人机飞行参数测量中的应用[J].火力与指挥控制,2009,34(6):174-176.
- [9] 胡士峰,马建仓.基于 MEMS 陀螺和加计的微惯性测量单元研制[J].航空计算技术,2008,38(6):115-118.
- [10] 李杰,刘俊,张文栋.微型惯性测量装置[J].仪器仪表学报,2006,27(6):1450-1451,1462.
- [11] 孙丽明. TMS320F2812 原理及其 C 语言程序开发[M].清华大学出版社,2008:149-194.
- [12] K9K8G08U0M datasheet. Samsung electronics.
- [13] 丁旭东,周静,牛洁,等.大容量 Flash 存储器在智能钻井测控系统中的应用[J].石油仪器,2008,22(1):80-83.
- [14] 李杰,马幸,刘俊,等.小型惯导系统数据实时采集处理与存储设计[J].中国惯性技术学报,2008,16(3):274-277.
- [15] 白福明,曹红松,赵捍东,等.基于 TMS320F28335 的弹体飞行参量采集硬回收系统设计[J].弹箭与制导学报,2011,31(4):218-221.
- [16] 杨志勇,文丰,郝晓剑.基于 Flash 存储器的抗高过载电子记录器关键技术研究[J].国外电子测量技术,2009,28(7):27-29.
- [17] 吉训生,王寿荣.硅微陀螺漂移数据滤波方法研究[J].传感技术学报,2008,21(2):333-336.



赵 诣(1987-)男,黑龙江省齐齐哈尔市人,现为中北大学在读硕士研究生,主要研究方向为微系统集成及自动控制,zhaoyi161033@163.com;



李 杰(1976-)男,山西省岚县人,博士,硕士生导师,2005年3月毕业于北京理工大学信息科学技术学院,获导航、制导与控制专业工学博士学位,现在中北大学“仪器科学与动态测试”教育部重点实验室工作,目前的主要研究兴趣为微系统集成理论与技术、惯性感知与控制技术、组合导航理论、计算几何及智能信息处理等,lijie@nuc.edu.cn.