

一种新型集成军械起爆控制系统的设计和验证

刘 婷 付宇卓 谢凯年 赵 峰

(上海交通大学微电子学院 上海 200240)

摘 要 在美国 Ensign Bickford 航天防务公司的“WizOrd™”智能起爆系统的架构基础上,参考 MIL-STD-1553b 军用总线协议格式,结合对当前业界各种工业总线系统的分析和借鉴,设计了一套军械起爆专用总线协议,并在选定的 FPGA 开发平台上完成了系统基本控制单元的验证和原型系统的功能和精度测试。经过测试,原型系统在通讯和关键时间参数方面获得了理想的结果。

关键词 集成军械起爆系统,分布式,总线拓扑,MIL-STD-1553b,高可靠性

Design and Verification of a New Kind of Integrated Ordnance Initiation Control System

LIU Ting FU Yu-Zhuo XIE Kai-Nian ZHAO Feng

(School of Microelectronics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract This paper develops a new kind of integrated ordnance initiation system architecture on the basis of the WizOrd™ Intelligent Initiation System, a Patent product of Ensign-Bickford Aerospace & Defense Company, USA. The construct of key protocol and processing flow make reference to the structure of MIL-STD-1553b and many other military and industrial field buses. The main control units of system construct blocks have been implemented and verified on the selected FPGA develop platform. The prototype system also passes the system level function and precision tests and gets desirable results in communication functionalities and critical response time specifications.

Keywords Integrated ordnance initiation system, Distribute, Bus topology, MIL-STD-1553b, High-reliability

1 引言

起爆系统作为军械武器弹药系统的控制中枢,负责保障战斗部平时的安全和在战时适时可靠的对战斗部进行解保险和起爆等操作。武器系统的发展和现代化战争对军械的体积、重量、低能耗性以及集成电路低能量输入、高性能输出方

面提出了更高的要求^[4]。尤其是高效毁伤和远程精确打击型武器以及与之相关的恶劣运行环境,要求军械起爆系统具有更高的安全性、精确性、可靠性和可配置性。基于以上需求,本文在借鉴美国 Ensign Bickford 航天防务公司的“WizOrd™”智能起爆系统^[1]架构的基础上,提出了一套全新的集成式军械起爆专用总线协议和相关的系统设计。

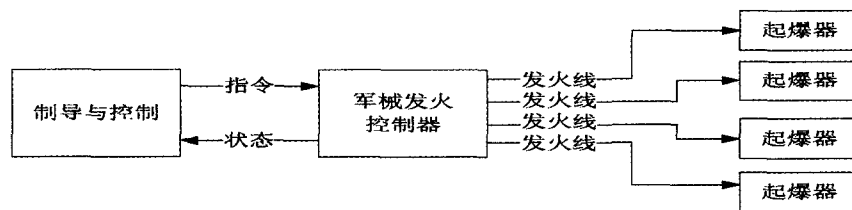


图 1 传统的军械起爆系统

2 军械起爆系统背景^[1]

2.1 传统军械起爆系统

如图 1 所示,传统的军械起爆系统通常包括以下部分:

- 制导和控制功能单元:

提供由事件时序确定的信息;

- 军械发火控制器:

接收由制导和控制功能单元发出的命令,并向起爆器提供发火电流;

- 发火线:

传输从武器点火控制器向起爆器的发火电流;

- 起爆器:

提供必要的爆破性输出以引爆相应单元。

2.2 “WizOrd™”智能起爆系统

美国 Ensign Bickford 航天防务公司的“WizOrd™”智能起爆系统的设计从结构上可以分为总线控制器模块和智能起爆器模块,两者之间的连接采用特定的编码总线取代了发火线,如图 2 所示。这样军械发火控制器就变成了总线控制器,在来自制导与控制功能模块的输入信号的指令作用下,对所有连在总线上的起爆器进行控制。

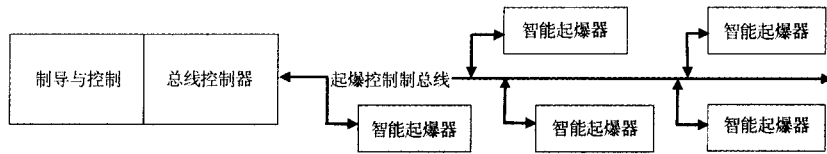


图2 可寻址军械起爆系统

与图1相比较,由于解除保险及发火功能转移和集成到了智能起爆器上,总线控制器结构和接口极大简化,可以视需要直接集成到制导和控制模块中。同时,总线拓扑结构决定了发火线的数量不随起爆节点的增加而变化,因此非常有利于引爆多节点火工品组,并降低军械系统的总成本。此外,减少起爆器发火作用要求的大电流电缆线路,对增强起爆器及系统的状态保护具有极大的好处。该系统可以广泛应用于乘

员逃逸、运载火箭、战术导弹、航天飞机和其它军械起爆场合。

3 起爆系统硬件架构的分析

参考“WizOrd™”智能起爆系统的架构,经过详细的性能指标分析,本课题所研究的可寻址起爆系统完整定义如图3所示。

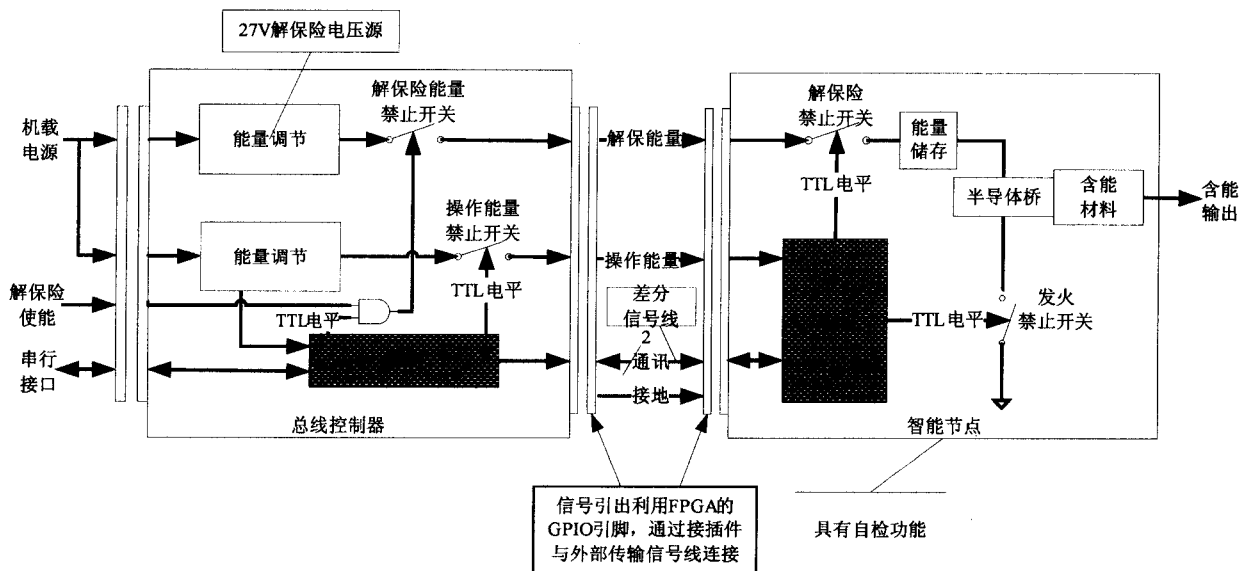


图3 总线控制器和智能节点结构框图

在图3中的系统中:

1) 起爆系统由一个总线控制器和多个智能起爆器构成,其中总线控制器是起爆系统中唯一的主设备,负责接收来自上位机的控制信息,对相应的智能起爆器进行相关的操作,并把执行结果反馈给上位机;

2) 系统总线在硬件上包括有2根电源线、2根差分信号通信线和1根地线。其中2根电源线分别为操作模块和解保电路提供能量,这里规定操作电压高于内部逻辑控制电路所需的最低电压,且低于起爆器不发火电压,保证了系统测试的可行性以及总线控制器和起爆器多重失效下系统的安全性。同时,根据系统内部结构的设计,要实现解保操作,该起爆系统需要上位机提供解保电源和相关解保指令,这样的设计符合“引信至少依靠两种不同的环境力解除保险”的引信冗余保险的设计安全标准规定^[5,6]。这里通讯线路采用了LVDS差分信号,目的在于提高总线的有效传输距离和速率,以满足10us量级点对点响应时间的关键性能指标要求(“WizOrd™”相应指标为ms级);

3) 信号编码以及所采用的协议,必须能确保与起爆器之间的双向通信稳定而可靠。

4 起爆专用协议的分析

4.1 协议性能指标

在当前的集成总线起爆系统设计中,最大的革新之处在于使用总线和数字编码控制命令代替了传统的点对点解保护和起爆,因此高效可靠的专用起爆通讯协议是该起爆系统的核心和关键。根据“WizOrd™”智能起爆系统的设计分析,结合相关项目性能指标,本课题所研究的起爆总线系统的通讯协议的需要具有以下性能^[1-3]:

1) 自计时编码:可以有效抑制收发系统时钟差异和时钟漂移带来的影响;

2) 时分多路复用主从结构:总线控制器作为主设备控制整个系统的动作,节点以指令中的地址地段判断是否进行相关操作;

3) 增强的混合差错控制:通过ARQ(自动重发请求)、ED(差错检测)与FEC(前向纠错)结合的混合差错控制技术,实现对报文“纠1检2”(可以纠正报文中所有的1位错误,并检测所有的2位错误)的差错处理。

4) 限定的响应时间:根据实际的设计需求,从总线控制器发出命令到智能节点产生相应的动作的时间差,以及广播命令下相关节点动作的时间差,都需要满足特定的指标。

4.2 基于1553b的协议模型分析

基于以上的分析,结合对当前业界相关总线协议的调研和分析,最终选定了MIL-STD-1553B总线作为起爆专用协议的参考模型,在此基础上定义和完善了针对当前系统专用

的高可靠性串行总线通讯协议。

MIL-STD-1553B^[7],简称1553B总线,全称是飞机内部时分制指令响应式多路传输数据总线。最初是在20世纪70年代末为适应飞机的发展由美国提出的飞机内部电子系统联网标准,由于其传输速率高,设备之间连接简单灵活,噪声容限高,通信效率高而且可靠,为美国军标所采用,将其作为机载设备相互通信的总线标准,其后在其他的机动武器平台上也得到了较广泛的应用。从推出到现在,经过30年的发展,1553B总线技术也在不断改进,目前1553B总线已经成为在航空航天领域占统治地位的总线标准。

4.2.1 协议模型选型依据

选用1553B总线作为参考协议模型的主要原因如下:

- 1) 总线拓扑结构:1553B总线采用双冗余的指令/响应时分复用总线结构,并使用差分信号通讯;
- 2) 实时性:1553B总线的标准传输速率为1Mbps,同时设定了多种硬性指标,如节点最大响应时间、最小消息间隔、最大消息长度等。这些参数从理论上可以满足当前起爆系统的相应时间指标,并有效保证总线效率;
- 3) 消息和编码格式:1553B总线上的信息以固定长度的消息字的格式传送,消息分为命令字、状态字和数据字三类,以自计时的曼彻斯特II型编码传输;

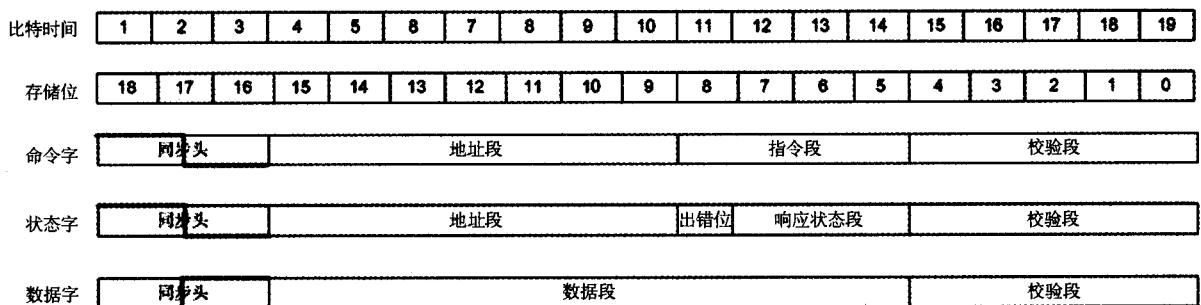


图4 起爆总线消息字格式

2) 增强的消息差错控制:

1553B总线采用了奇偶校验,仅能检测出消息中的一位错误,对一位以上的错误不起作用;同时,一旦出现校验错误,节点便会启动自动重传机制,拒绝响应并等待总线控制器的超时处理,这样大量的时间会浪费在超时等待和消息重传上。在干扰较大的环境下,频繁的重传会大大降低总线效率。因此,在当前的实际起爆总线协议设计中,按照“WizOrd™”的设计,综合考虑有效消息长度和整体消息长度,采用了扩展海明码^[8]作为校验算法,可以实现“纠1检2”的差错处理,大大提高了总线的容错性。设计中为了保证能够达到1553B总线理论上1Mbps的传输速率,调整了有效消息长度,采用5位的冗余码实现对11位有效消息的校验,把整体消息长度控制在1553B消息长度之内。

3) 自动重传申请、自动重发和错误反馈机制:

1553B总线中,节点利用不返回状态字的方式向总线控制器进行自动重传申请,并通过在返回状态字中的消息错误位置1通知总线控制器上次的命令有误;总线控制器则利用设定的最大响应时间和实际消息检测接收结果,判定是否进行自动重发和相关指令内容。在当前设计中,需要确定这些机制的具体进入条件和处理流程,并详细分析所有可能出现的错误组合,确保处理机制的封闭性。同时,总线控制器和节点之间的重传机制需要符合时分制多路复用总线特征,确保

4) 差错控制技术和方式命令:1553B总线采用了反馈重传纠错和奇偶校验纠错来保证传输数据的完整性,特有的方式命令可以完成数据传输控制、故障检查和错误处理等任务。

除此之外,还有特定的广播机制、地址分配等。这些特征与上一节中分析的系统设计需求非常类似。

4.2.2 特定化修改和完善

基于以上分析,1553B总线在总体上基本符合智能起爆总线协议设计的要求,是理想的协议设计参考模型。但一些关键特性还需要我们根据当前设计修改和完善,具体体现在:

1) 消息的内容和传输机制:

由于1553B总线的最主要目标是数据传输^[7],因此在命令字中定义了用于子系统地址控制和方式命令模式的复用域,同时还规定了多种数据传输方式。在当前的起爆总线系统中,主要的目标是操作控制和信息查询,在通讯上没有大数据量传输的要求,因此在数据传输方式定义上可以作适当简化,保留了最基本的“总线控制器→节点”和“节点→总线控制器”的指令/响应的消息传输方式;在消息自身格式方面,去掉子系统数据传输的复用域,保留方式命令相关的域;此外,地址域的长度还需要根据实际系统的可寻址节点数量进行修改,同时重新定义状态字中实际需要的状态位。根据系统需要重新定义的消息字格式如图4所示。

不会因为重传机制而发生数据冲突,导致串行传输通道失效。

4) 定时指标的设定:

在1553B总线中,使用了多种硬性的定时机制保证总线的传输效率,其中一些定时参数是根据总线的消息字长和实际传输情况估算出来的,例如最大消息长度、总线控制器端的节点最大不响应时间等。在当前的设计中,由于改变了消息字长和传输机制,这些时间参数需要根据当前设计重新估算。

此外,还需要考虑广播指令和常规指令各自的处理流程、最大重传次数设定等方面的设定,保证整个协议处理流程的完整和可靠。

5 起爆控制系统的实现

根据前面制定的系统硬件架构和起爆专用协议,我们使用Verilog HDL对总线控制器和智能节点进行建模,并在Xilinx Spartan-3E FPGA开发板^[9]上进行了功能验证。在实现过程中,对总线控制器和智能节点的控制单元采用了不同的设计方案。

5.1 智能节点

智能节点主要负责接收来自总线控制器的命令,执行相关的输出操作,并返回相应的状态,其内部操作的执行时间是相当关键的性能指标之一。因此,对于智能节点,采用了纯硬

件设计的方法,硬件化的模块包括差分信号转换、曼彻斯特编解码、消息的串并转换、扩展海明校验编解码、相关指令检测与执行以及各种自动重传申请与错误反馈处理流程。这样的

纯硬件结构有利于提高节点在处理速度上的性能,并降低芯片成本。智能节点控制单元的内部结构如图 5 所示。

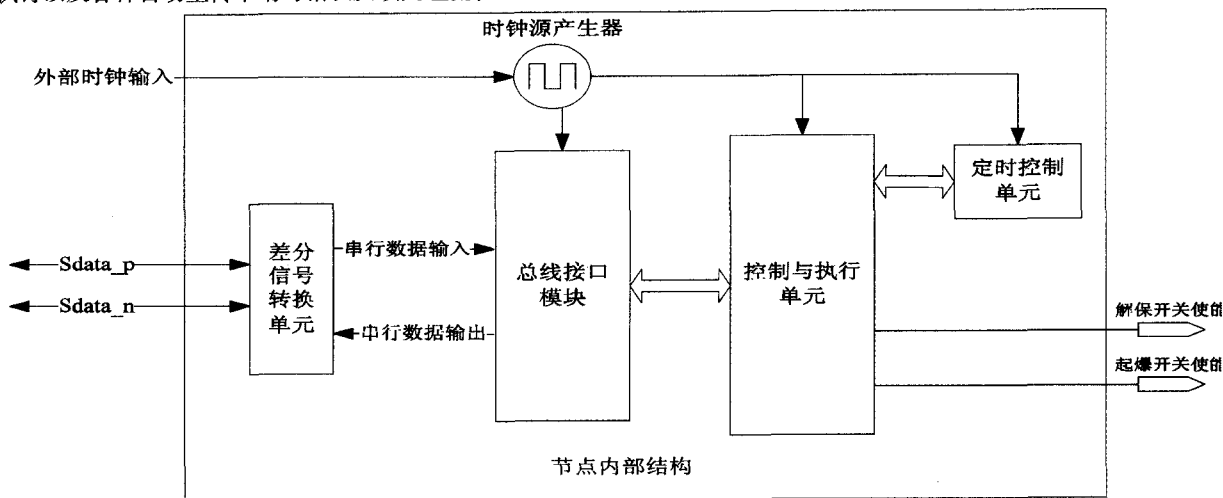


图 5 节点控制单元结构图

5.2 总线控制器

总线控制器除了负责系统控制之外,还需要接收和缓存来自上位机的高级指令并翻译成起爆总线系统专用的机器指

令,同时处理节点返回的状态并报告给上位机。基于这样的设计需求,总线控制器的设计采用了 SOPC 的嵌入式系统架构方案。

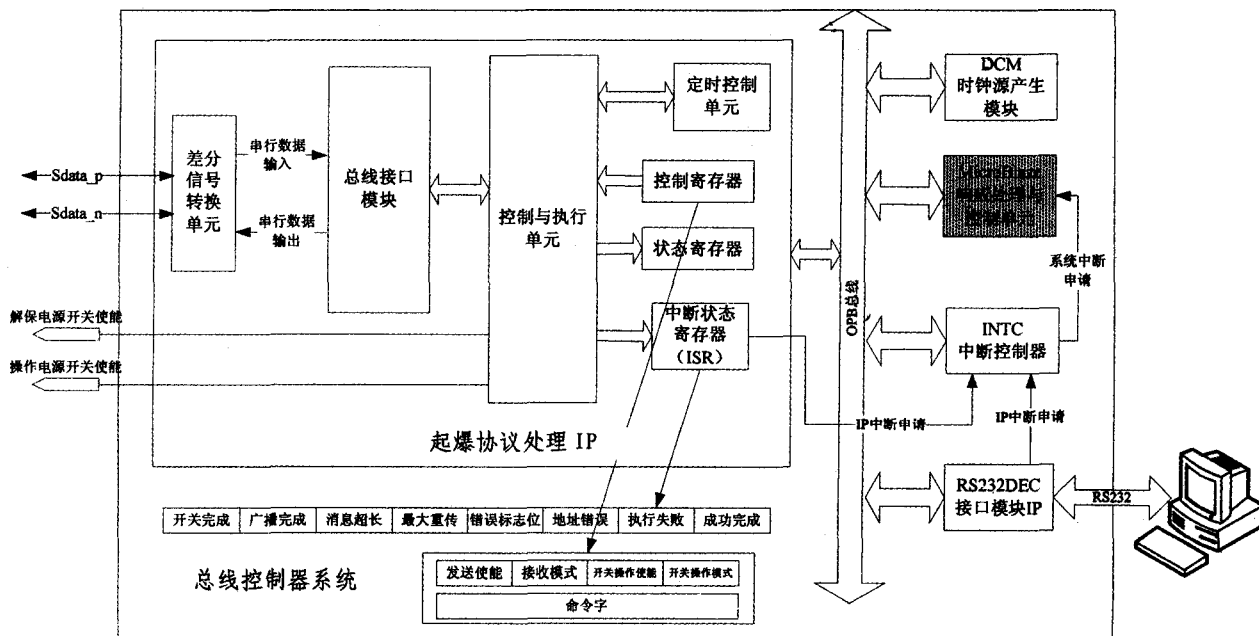


图 6 总线控制器控制单元结构图

利用 Xilinx 嵌入式开发套件 EDK 建立的总线控制器基本系统,如图 6 所示。系统采用了 Xilinx 可配置软核 MicroBlaze 作为系统的 MCU,RS232 接口 IP 和相关底层驱动由 EDK 提供,可以直接集成到系统中。这样就可以直接利用开发板上的 RS232 串口资源实现总线控制器与上位机之间的通讯。RS232 的中断处理流程如图 7 所示。

在实际操作中,MCU 只需要在完成系统初始化之后,通过系统 OPB 总线把控制和命令字内容写入起爆协议处理 IP 的控制寄存器,除此之外的所有总线控制器端的协议处理功能,如超时自动重传、超长消息检测等,均由起爆硬件实现。协议处理 IP 只有在遇到自身无法处理的情况(如接收处理完

毕、达到最大重传次数、发送超长消息等)时,才会向 MCU 发起中断请求。中断信息由 MCU 嵌入式软件处理后报告给上位机,由上位机确定下一步的操作。中断源信号的状态在设计上尽量简化,利于软件快速查询中断状态寄存器 ISR 的内容并做出判断。协议处理 IP 的中断处理流程如图 8 所示。

值得注意的是,在 RS232 和协议处理 IP 的中断处理流程中均有启动协议处理 IP 的操作,其中命令/控制缓存队列从空到非空后的第一个命令是通过 RS232 中断处理流程写入的,其余命令都是通过协议处理 IP 的中断处理流程写入的。在中断优先级设定上,协议处理 IP 的中断优先级高于 RS232,即在没有得到上一条命令的明确状态回复之前,总线

控制器不会发送下一条命令。

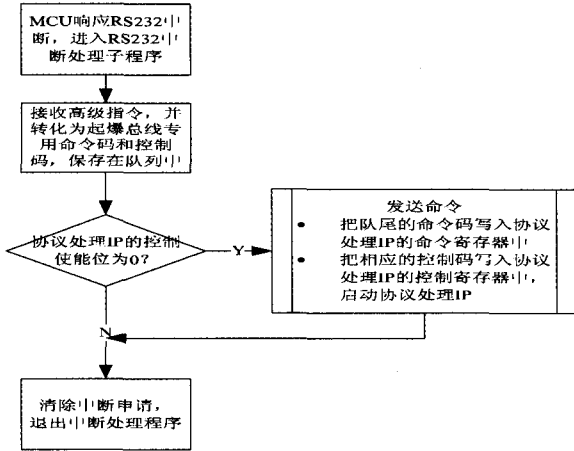


图7 RS232中断处理流程

当前总线控制器中的硬件设计不涉及指令本身的内容, 所有的指令解释均由软件完成。这样的软硬件划分有利于指令集修改扩充、协议 IP 重用和系统集成。

6 起爆系统的验证

完成了总线控制器和智能节点模块之后, 进行了原型系统的通讯和控制功能测试。原型测试系统包括上位机(PC), 1个总线控制器和2个智能节点模块, 如图9所示。其中总线控制器和上位机之间使用RS232串口电缆连接, 总线控制器和智能节点之间使用双绞线连接, 信号传输采用了2.5V驱动的标准LVDS差分信号, 节点采用直接耦合的方式接入总线, 通讯距离为10米。

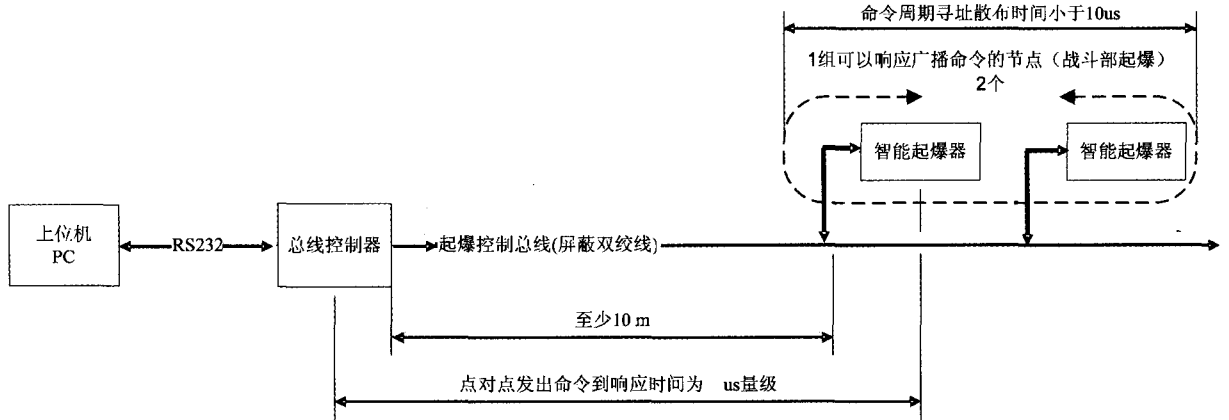


图9 最小起爆测试系统结构图

在完成了最小系统测试之后, 下一步的工作将根据测试结果, 进行多负载情况的总线信号完整性分析, 开发相应的接口电路, 并针对运行环境进行进一步的系统可靠性优化。

总结 本军械起爆系统的架构和相关功能标准设计参考了美国 Ensign Bickford 航天防务公司的“WizOrd™”智能起爆系统; 在 1553b 军用总线协议基础上, 制定了起爆专用协议, 在操作控制、差错控制、重传处理等方面针对当前起爆系统进行了优化; 在实现方面, 针对不同的功能和性能指标, 为总线控制器和智能节点的控制单元制定了不同的实现方案, 在协议和架构设计上最大程度地保证了系统的响应速度、可靠性和集成度。利用 Verilog HDL 作为输入, 在 Xilinx Spar-

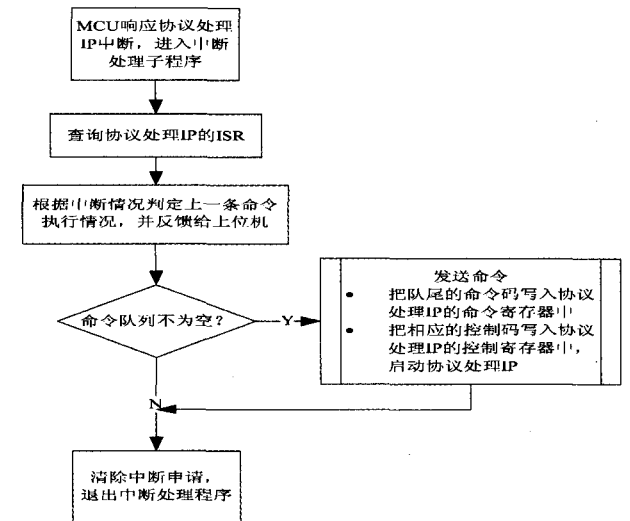


图8 协议处理 IP 中断处理流程

测试中, 在上位机上使用 VC++ 编写的图形界面对整个系统进行控制, 并获取所有节点的状态和指令的执行结果。基本测试指令包括: 常规和广播模式下的操作指令(解保和起爆)、自检/查询指令(返回节点内部事前设定的延时起爆定时寄存器的状态)。

通过对 Xilinx 硬件波形观测工具 ChipScope Pro 观测的 FPGA 硬件内部信号和示波器观测外部传输总线信号波形的检测, 原型系统的功能符合制定的通讯协议, 并获得了理想的输出信号和点对点响应时间。其中从示波器观测到总线上传输的曼彻斯特编码的消息波形如图 10 所示。

tan-3E FPGA 开发平台上对最小起爆系统进行了功能验证和基本特性测试。

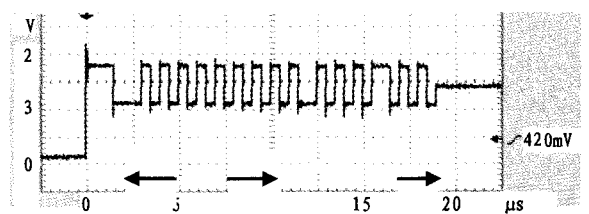


图10 总线传输消息的差分信号观测

图3所示为四种媒体业务的时延抖动。由于在仿真中设置了四种媒体业务的时延抖动门限为1ms,当采用动态PSR策略时,媒体业务的时延抖动门限可以得到很好的满足;而采用固定PSR策略则不能满足时延抖动要求,其时延抖动在10ms附近。

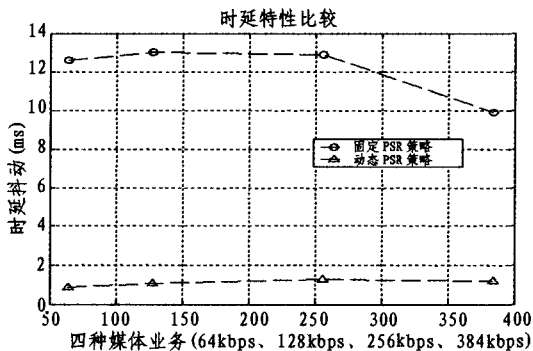


图3 四种媒体业务的时延抖动

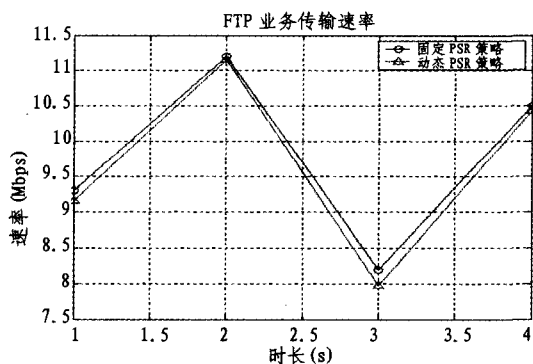


图4 FTP业务速率曲线

图4所示为并发的FTP业务的速率曲线。由于FTP业务对时延不敏感,因此没有为该业务设置时延抖动门限。由于媒体业务采用了动态PSR策略,因此对资源有额外消耗,但观察FTP业务的传输速率,这种代价与固定PSR策略相

比相差甚少,基本上在100kbps左右,在信噪比较好的条件下,差异更小。

结论 本文提出的一种OSTBC-OFDM下行链路中的跨层自适应算法,综合考虑OSTBC-OFDM系统中各个信道衰落特性和业务传输的QoS要求,在传输过程中实时计算各个业务数据包的 φ 值,根据 φ 值调整该数据包的传输PSR要求,并以此指导OSTBC-OFDM系统的功率分配与编码调制方式配置,从而在为各个业务传输QoS保障的情况下最大化传输效率。仿真结果表明,该算法有效地满足了媒体业务QoS要求,同时对于最大化OFDM系统传输效率的弱化很小,提高了空口的频谱资源利用率。

参考文献

- 1 Ergen M, Coleri S, Varaiya P. QoS aware adaptive resource allocation techniques for fair scheduling in OFDMA based broadband wireless access systems. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2003, 49(4)
- 2 孙卓,彭木根,王文博. 保证混合业务质量的跨层OFDMA资源分配方法. *北京邮电大学学报*, 2006, 29(6)
- 3 Koutsopoulos I, Tassiulas L. Channel state-adaptive techniques for throughput enhancement in wireless broadband networks. In: *INFOCOM*, 2001, 2: 757~766
- 4 卢小峰,朱光喜,宁国勤,等. 一种自适应跨层空间子信道分配算法. *计算机科学*, 2006, 33(11)
- 5 Lu B, Wang X. Space-time code design in OFDM systems. In: *IEEE Press, GLOBECOM*. San Francisco, USA; IEEE Press, 2000, 1000~1004
- 6 Telatar I E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. *AT&T Bell Labs, Internal Tech. Memo*, 1995
- 7 Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*, 1999, 10(6): 585~595
- 8 Gore D, Paulraj A. MIMO antenna subset selection with space-time coding. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2002, 50: 2580~2588

(上接第101页)

该军械起爆系统实现了起爆控制方式的革新,在安全性、精确性、可靠性和可配置性等方面进行了优化,有利于我国现代化武器在精确打击和高效毁伤方面的综合性能提升。

参考文献

- 1 Boucher C J, Novotney D B. Ensign-Bickford Aerospace & Defense Company Simsbury, Connecticut Performance evaluation of an addressable integrated ordnance system. *AIAA 2001-3636*
- 2 United States Patent, ORDNANCE FIRING SYSTEM, Patent No. :US 6,584,907 B2
- 3 Novotney D B, Kochanek A. Ensign-Bickford Aerospace & Defense Company, Simsbury, CT, 06070. Intelligent Initiation Sys-

tems for Divert and Attitude Control Applications. *AIAA 2005-4502*

- 4 徐衍海,惠蕾. 火工系统新技术的发展动向. *火工品*, 2001, 1
- 5 章洪深. 美国军用标准 MIL-STD-1316D 引信安全性设计准则 [J]. *探测与控制学报*, 1994(1)
- 6 赵振海. 对 GJB373A-1997《引信安全性设计准则》的理解与探讨 [J]. *国防技术基础*, 2004(5)
- 7 MIL-STD-1553B Military Standard. Digital Time Division command/Response Multiplex Data Bus Notice 2 [S]
- 8 张娟,张雪兰. 扩展的海明码及其在FLASH/EEPROM中的应用 [J]. *兵工自动化*, 2003(3)
- 9 Xilinx Spartan-3E Starter Kit Board User Guide, UG230 (v1.0) March 2006