Website: ycyk.brit.com.cn

运载火箭新一代遥测系统中FC-AE-1553总线技术 应用研究

郝现伟¹, 王报华¹, 涂晓东², 王 昕¹, 谢 军², 王阳硕³, 李 明³ (1北京宇航系统工程研究所北京100076;

2 电子科技大学 成都 611731;

3成都光航信科技有限公司成都 611731)

摘要:随着军用电子系统对网络实时性和确定性的要求越来越高,FC-AE-1553作为一种实时性强、确定性高的基于光 纤通道的命令响应网络协议,已经越来越广泛地应用于航空电子环境的数据传输、飞行控制等领域。介绍了FC-AE-1553总 线的基本特性,并以运载火箭遥测系统为背景,构建简单星形网络拓扑,采用FC-AE-1553总线协议为通信载体,验证FC-AE-1553总线技术在运载火箭遥测系统中的适用性。

关键词:运载火箭;遥测系统;FC-AE-1553总线

中图分类号: V556.1; TN953 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2024)02-0050-12

DOI: 10.12347/j.ycyk.20231108001

引用格式:郝现伟,王报华,涂晓东,等.运载火箭新一代遥测系统中FC-AE-1553总线技术应用研究[J].遥测遥控, 2024,45(2):50-61.

Research of FC-AE-1553 Bus Technology for Launchers Telemetry System

HAO Xianwei¹, WANG Baohua¹, TU Xiaodong², WANG Xin¹, XIE Jun², WANG Yangshuo³, LI Ming³

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

3. Chengdu Fiber-Link Technology CO., LTD., Chengdu 611731, China)

Abstract: As the military electronic system demands more and more the real-time and certainty of the network, FC-AE-1553, as a command response network protocol based on fibre channel with strong real-time and high certainty, has been more and more widely used in the fields of data transmission and flight control in avionics environment. This paper introduces the basic characteristics of FC-AE-1553 bus, then takes the launch vehicle telemetry system as the background, constructs a simple star network topology, and uses FC-AE-1553 bus protocol as the communication carrier to verify the applicability of FC-AE-1553 bus technology in the launch vehicle telemetry system.

Keywords: Carrier rocket; Launchers telemetry system; FC-AE-1553 Bus

Citation: HAO Xianwei, WANG Baohua, TU Xiaodong, et al. Research of FC-AE-1553 Bus Technology for Launchers Telemetry System[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(2): 50–61.

0 引言

遥测系统是运载火箭的关键系统之一,为火 箭飞行环境参数获取起到关键作用。传统运载火 箭遥测系统采用的方案为"分布采集-逐级综合" 式,即由多个采编单元和一个数据综合设备组成。 采编单元根据需要分布于全箭各舱段,负责遥测 参数的远端就近采集,并把采集的数据编码通过 RS422串口传输至数据综合设备,数据综合设备再 采用无线点频 PCM-FM 体制将遥测数据传至地面 数据接收设备。

新型运载火箭产生的大量复杂的数据给新一 代遥测系统带来了挑战。基于RS422总线设计的 传统遥测系统具有通信速率低、系统可扩展性差 等特点,已经不能够满足井喷式增长的各类信息的处理和传输要求,亟需一种具有更高带宽、更高可靠性和低延迟的新型总线代替RS422总线作为遥测系统主干网。光纤通道技术(Fiber Channel, FC)具有高带宽、低时延、吞吐率高的特性^[1],上层协议接口可兼容多种协议,是航电网络解决方案之一^[2]。FC协议标准开发委员会因此制定出了光纤通道航空电子环境协议簇(Fiber Channel Avionics Environment, FC-AE), FC-AE-1553是其中一个协议。

FC-AE-1553协议支持航电系统中设备的高可 靠通信连接,可兼容MIL-STD-1553B总线^[3]。FC-AE-1553总线作为高速率确定型新型总线^[4],与传 统MIL-STD-1553B^[5]相比较,具有通信速率超过 8Gb/s、光纤对电磁干扰免疫、可以使用商用货架 光模块、光纤等优势,为传统遥测系统升级换代 在技术上和经济上提供了条件。目前,国内已经 具有成熟的自主研发的FC网络设备,包括FC交换 机和终端仿真节点卡等产品^[6,7]。

业界对FC-AE-1553的研究主要围绕协议分 析、应用探索、性能评估等方面展开。在协议分 析方面, 鞠铭阳^[8]等人分析了FC-AE-1553协议的 网络架构、传输模式等,提出了协议的简化和优 化方案: 王世奎^[9]研究了飞行悬挂物 FC 网络标准 与FC-AE-1553标准的关系。在应用探索方面,车 明¹¹⁰设计了一种面向FC-AE-1553协议的无源光网 络(Passive Optical Network, PON)型网络的分层节 能模型,而且给出了一种三层(交换层、链路层、 物理层)网络节点设计方案;杜玲凹以航天器测量 系统为背景,构建总线简单环形拓扑结构,为系 统典型设备设计FC-AE-1553总线接口模块;朱浩 文^[12]在分析FC-AE-1553协议的基础上,提出一种 基于ABTS的FC-AE-1553交换管理模块实现方案, 并详细分析了交换处理流程;王亘四提出了一种 FC-AE-1553网络互连控制系统的设计和实现方法, 解决了传统总线易受电磁干扰、可靠性差、大数 据传输实时性差、布线复杂等问题; Zhan^[14]提出了 将动态带宽分配(Dynamically Bandwidth Assignment, DBA)应用于交换式 FC-AE-1553 网络的方 案,提高了网络吞吐量,同时确保对网络中的业 务进行公平处理;高润莲^[15]设计了基于FC-AE的 数据收发系统架构,并通过功能仿真和硬件调试 验证了系统的正确性。在性能评估方面,曹素芝[16] 针对仲裁环型与交换式FC-AE-1553 总线时间延迟 不易确定的问题,在总线型PON网络结构下设计 了一种基于下行广播、上行时分复用的传输机制, 并分析证明了其严格实时性;房亮^[17]对FC-AE-1553 网络的消息传输过程、信息类型及相关参数 进行了详细分析,并结合通信时间、传输差错的 要求,给出了通用的传输效率计算方法; 王报华^[18] 介绍了FC-AE-1553 光纤总线技术在运载火箭测量 系统中的应用,提出了基于FC-AE-1553 光纤总线 技术实现测量系统数据传输的系统架构。

本文继续对FC-AE-1553总线技术在运载火箭 新一代遥测系统中的应用进行研究,首先对FC-AE-1553总线进行介绍,然后利用FC-AE-1553总 线进行系统设计,最后搭建了验证系统对实时性、 通信带宽、可靠性等进行了测试。该总线具有 100%自主知识产权,完全自主可控,可以应用于 运载火箭电气系统,还可用于导弹、空天飞行器、 航空飞行器、兵器、汽车等领域。

1 新一代遥测系统 FC-AE-1553 设计

1.1 系统工作原理

如图1所示,整个FC-AE-1553遥测系统由I级 网络以及II级网络共同组成。其中,I级网络包含 2个测量终端和2个互为冗余的网络交换机,II级 网络包含1个遥测综合控制器、1个测量终端以及 2个互为冗余的网络交换机。设备与设备之间,网 络与网络之间都通过光纤进行互联,采用FC-AE-1553光纤传输协议作为载体进行数据通信。

遥测综合控制器是系统中的主控设备,其在 FC-AE-1553 网络中扮演网络控制器(Network Controller, NC)节点的功能。当遥测系统处于正常工 作状态时,遥测综合控制器将会周期性通过FC-AE-1553 网络读取测量终端采集到的数据,并将其 在一个周期内从各测量终端读取到的数据进行汇 总,然后经过数据综合、PCM-FM 调制处理等步 骤,最终将调制后的遥测数据通过遥测天线传回 地面数据接收设备中。

测量终端是系统中的终端设备,其在FC-AE-1553 网络中实现网络终端(Network Terminal,NT) 节点的功能。测量终端会周期性地采集火箭姿态、 发动机姿态等传感数据,然后等待遥测综合控制 器通过FC-AE-1553 网络取走测量终端采集到的传 感数据。



图 1 基于FC-AE-1553 总线的火箭遥测系统构成 Fig. 1 Construction of rocket telemetry system based on FC-AE-1553 Bus

网络交换机是系统中的互联设备,其在FC-AE-1553 网络中实现了不同通信节点间的转发功 能。对于一个由多个设备组成的光纤通道(Fibre Channel, FC)网络来说,互联设备是其中必不可少 的一部分,利用互联设备可以将一个简单的网络 扩展成复杂的网络。遥测综合控制器在进行采集 测量终端的有效数据流程时,通信数据会首先被 送入网络交换机,经由网络交换机的转发,通信 数据才能正确地流向目的设备。

由于FC-AE-1553协议规定采用命令响应式进 行数据的通信,也就是说一切通信的发起者都是 NC节点,而NT节点只能被动地响应NC节点发出 的请求,因此,在本FC-AE-1553遥测系统中,不 论是遥测综合控制器向测量终端发送控制指令, 或是遥测综合控制器获取测量终端发送控制指令, 或是遥测综合控制器获取测量终端从传感器收集 到的遥测数据,都需要由遥测综合控制器主动开 始数据通信流程。从这个角度来说,整个系统的 时间的确定性非常重要:何时遥测综合控制器开 始从测量终端读取数据才不会取到无效数据,何 时遥测综合控制器给测量终端发送控制指令才不 会影响测量终端正常工作。综上考虑,整个遥测 系统网络的时间统一性也是必须满足的。

FC-AE-1553 遥测系统使用两种通信模式,它

们分别是NC-NT模式以及NT-NC模式。NC-NT模 式用于NC节点向NT节点发送数据,NT-NC模式 用于NC节点从NT节点取数据。使用这两种模式 可以满足遥测综合控制器能够向测量终端发送控 制指令以及从测量终端读取遥测数据的要求。另 外,FC-AE-1553遥测系统采用FC原语时间同步, 可以实现将网络中的各节点的本地时间统一到遥 测综合控制器的时间上,这样就能有效减少系统 出现问题的可能,增加网络安全性。

1.2 FC-AE-1553协议

FC-AE-1553协议是FC-AE协议簇的子协议, 该协议是由传统的MIL-STD-1553B总线协议扩展 而来的一种基于光纤通道的命令响应网络协议。 FC-AE-1553网络由网络控制器NC和网络终端NT 组成。NC和NT节点之间的一次通信称为一次消 息(或称为一次交换),一次消息是由多个序列(命 令序列、数据序列、状态序列)组成,一个序列又 是由一个或多个FC-AE-1553帧组成。与其他很多 通信协议相比,FC-AE-1553协议最显著的特点是 其采用命令响应式的方式进行通信,命令响应式 的命令指一切FC-AE-1553通信的发起点都是NC 节点,响应指任意一次通信的流程都需要NT节点 有所响应。例如一次NC-NT的通信,NC节点在向 NT节点发送完毕数据后,会等待接收NT反馈的 响应信息,并依此判断此次通信是否工作正常。 采用命令响应式的通信机制,使得FC-AE-1553总 线的NC节点能够明确每次通信成功与否,极大地 增大了通信的可靠性。

1.2.1 FC-AE-1553 帧格式

与传统1553B总线使用命令字、数据字和状态 字进行数据通信类似,FC-AE-1553协议在通信中 也使用了三种功能不同的帧,分别是只能由NC发 出的命令帧、只能由NT发出的状态帧以及NC和 NT都可以发出的数据帧。

三种帧的格式如图2所示, 三者都包含帧头定 界符(SOF)、通用帧头、负载、循环冗余校验(Cyclical Redundancy Check, CRC)、帧 尾 定 界 符 (EOF),区别仅在于是否存在负载扩展帧头字段, 其中命令帧存在大小为24字节的负载扩展帧头, 该扩展帧头用于描述整个消息的基本信息;状态 帧存在大小为8字节的负载扩展帧头,其用于描述 整个消息的通信状态;数据帧则不存在负载扩展 帧头。

1.2.2 FC-AE-1553通信模式

FC-AE-1553 协议规定了多种通信模式,在本系统中使用了NC-NT模式、NT-NC模式,这两种模式工作流程如图3所示。

NC-NT模式是一种NC节点向单个NT节点或

- FC-AE-1553命令帧格式 -负载 扩展帧头 SOF 通用帧头 CRC EOF 负载 4字节 24字节 24字节 0~2048字节 4字节 4字节 FC-AE-1553状态帧格式 -负载 扩展帧头 SOF 通用帧头 负载 CRC EOF 4字节 24字节 8字节 0~2048字节 4字节 4字节 FC-AE-1553数据帧格式 SOF 通用帧头 CRC EOF 负载 4字节 24字节 0~2112字节 4字节 4字节 图2 FC-AE-1553 帧格式 Fig. 2 FC-AE-1553 frame format

是多个NT节点发送数据的通信模式。

NC节点根据一次消息的通信数据量将待发送 数据依次封装在命令帧、数据帧中,然后将其发 送至对端NT节点。NT节点在接收到NC节点发送 的所有数据后,反馈状态帧到NC节点并结束此次 消息。

NT-NC模式是一种NC节点主动读取NT节点数据的通信模式。

NC节点首先主动向 NT 节点发送命令帧,告



知NT节点本次通信需要从NT端读取的数据长度, 然后NT节点将待发送数据依次封装在状态帧、数 据帧中,并将帧反馈回NC节点,最终在发送完毕 所有数据后结束此次消息。

1.3 FC-AE-1553遥测系统设计

1.3.1 系统总线周期和时隙分配

FC-AE-1553 遥测系统需要完成三种基本功能, 分别是遥测控制器采集测量终端数据、遥测控制 器向测控终端发送控制指令、遥测控制器统一系 统时间。对于这三种基本功能,遥测控制器采集 测量终端数据使用FC-AE-1553协议中的NT-NC通 信模式;遥测控制器向测量终端发送控制指令以 及统一系统时间指令都使用FC-AE-1553协议中的 NC-NT通信模式。如图4所示,系统总线周期由 20 ms的大周期和5 ms的小周期共同构成,在 20 ms大周期内,遥测控制器将会遍历所有测量终 端并读取每个测量终端在大周期内采集到的数据。 每个20 ms的大周期又可细分为4个5 ms的小周 期,单个5 ms的小周期又被划分了25个时隙。



Fig. 4 System bus cycle description

时隙序号	FC-AE-1553通信模式	时隙功能说明
1	NC-NT	NC向所有NT广播时间信息用于统一系统时间 (仅第一个5ms周期有效)
2	NT1-NC	NC从NT1读取采集数据
3	NT2-NC	NC从NT2读取采集数据
21	NT20-NC	NC从NT20读取采集数据
22	NC-NTx/空消息	NC向NTx发送控制指令/若无控制指令发送则空闲
23	NC-NTx/空消息	NC向NTx发送控制指令/若无控制指令发送则空闲
24	NC-NTx/空消息	NC向NTx发送控制指令/若无控制指令发送则空闲
25	NC-NTx/空消息	NC向NTx发送控制指令/若无控制指令发送则空闲

图5 时隙功能说明

Fig. 5 Time slot function description

如图5所示,5ms的小周期细分为20个时隙。 其中,第1个时隙用于遥测控制器将系统时间统 一,第2~21个时隙用于遥测控制器遍历20个测量 终端,第22~25个时隙用于遥测控制器根据需要向 20个测量终端发送控制指令。需要说明的是,第 1个时隙仅在第一个5ms周期有效,剩余3个5ms 周期的第1个时隙都为空消息。另外,时隙第22~ 25个时隙需要根据当前遥测控制器是否有控制指 令需要发送来判断填充消息,若有控制指令待发 送则填充控制指令,若没有则当前时隙空闲。 1.3.2 时钟同步

FC-AE-1553 遥测系统使用FC原语时钟同步功 能和FC-AE-1553消息时间同步功能保证了整个系 统的时间统一性。FC原语时钟同步是FC协议中规 定的一种通过 FC 原语将两个互联 FC 设备的时间进 行同步的方法。首先, FC 原语时钟同步功能存在 两个端口, 它们分别是时间同步主端口和时间同 步从端口, 主端口会定时向从端口发送 Syncx, Syncy, Syncz原语,这三种原语包含主端口的时 间信息,从端口在接收到同步原语后,将时间信 息提取出来然后将本地时间同步,通过原语时间 同步功能可以将FC两端的设备时间统一。对整个 系统来说,只需要遥测控制器先同步交换机设备, 然后交换机设备再同步其他设备,这样就可以将 所有设备的时间同步到遥测控制器的时间上,如 图6所示。利用NC-NT广播消息将遥测控制器应 用层周期工作时间通知其余测量终端实现FC-AE-1553 消息时间同步。通过 FC 原语时间同步以及 FC-AE-1553 消息时间同步最终实现整个系统的工 作时间都是统一且确定的。

1.3.3 FC 总线模块设计

如图7所示,FC总线模块从FC层次上可以分为4层,具体描述如下。

FC-1层: GTX模块完成并行数据和串行信号之间的转换以及编码解码工作。字同步模块和链路建立模块完成接收数据重排序以及FC链路建立工作。

FC-2 层: FC 帧发送模块完成对待发送 FC 帧 的最终处理并发送的功能,FC 帧接收模块实现对 接收数据还原成FC 帧的功能,FC 时间同步模块实 现FC 原语时间同步功能。

FC-3 层:实现热双冗余功能。发送冗余模块 实现将待发送 FC 帧数据冗余下发功能,接收冗余 模块实现接收 FC 帧的冗余接收功能。



Fig. 6 FC primitive clock synchronization description

FC-4层:发送调度模块用于处理NC状态机、 NT状态机的发送FC帧数据请求,并选择其中之一 下发。接收调度模块用于仲裁冗余后的FC帧数据 的去向,根据特定信息将数据送入NC状态机或 NT状态机或NM状态机。NC状态机模块实现FC-AE-1553协议中的NC节点功能,NT状态机模块实 现FC-AE-1553协议中NT节点功能,NM状态机模 块实现监听功能。指令/数据模块用于与用户逻辑、 NC状态机逻辑、NT状态机逻辑、NM状态机逻辑 的数据信息,指令信息交互工作。配置模块对整个 FC-AE-1553总线模块的功能以及工作状态做出 控制。

2 性能指标

遥测 FC-AE-1553 总线系统传输速率支持 1.062 5 Gbps,可扩展为2.125 Gbps、4.25 Gbps。

遥测 FC-AE-1553 总线系统误码率极低,通过 FC协议的保障,误码率能够低于10⁻¹²。

遥测 FC-AE-1553 总线系统传输采用光纤线 缆,线缆成本较低,重量较轻,电磁干扰对光信 号影响极小。

遥测 FC-AE-1553 总线系统采用双冗余机制、 FC链路建立机制、FC流量控制机制、命令-响应 型通信机制等保证系统通信的可靠性。

遥测 FC-AE-1553 总线系统时间同步误差小于 等于100 ns。

遥测 FC-AE-1553 总线系统网络拓扑搭建方



图 7 FC 总线模块功能结构图 Fig. 7 FC bus module function structure diagram

便,易于扩展。

遥测 FC-AE-1553 总线与传统 MIL-STD-1553B 总线以及 RS422 总线对比见表1。

3 验证系统

在实验室搭建FC-AE-1553总线验证系统,如 图8所示。

3.1 FC-AE-1553 总线验证系统测试项目

3.1.1 系统NT-NC总线通信功能 系统NT-NC总线通信功能由NC定时地从各个 NT获取遥测数据来实现。

NC向NT1发送一个命令序列,告知NT1将采 集到的遥测数据反馈回来。NT1接收到遥测综合 控制器NC发送的指令后,返回状态序列,即是遥 测数据。紧接着遥测综合控制器NC继续依次向 NT2、NT3、NT4等发送命令序列并接收反馈的遥 测数据,最终在完成对所有测量终端的数据采集 后,遥测综合控制器NC把测量终端反馈的数据整 合在一起,显示在上位机应用程序上。

2024年3月

表1 总线对比汇总表

	Table 1 Bus c	omparison summary table	
对比项目	FC-AE-1553	MIL-STD-1553B	RS422
传输速率	1/2/4 Gbps	1 Mbps	10 Mbps
误码率	≤10 ⁻¹²	≤10 ⁻⁶	≤10 ⁻⁶
传输介质	光纤线缆	双绞屏蔽线、总线末端匹配电阻、总线耦合变压 器以及收发器等	双绞屏蔽线
可靠性	采用命令响应式通信会话模式。所有会话由 NC发起,一个会话成功或超时后再发起下一个 会话,在NC端就可以控制整个总线的通信顺序 和确定故障节点,确定性高。双链路冗余传输, 系统可靠性高。	采用命令响应式通信会话模式。所有会话由BC 发起,一个会话成功或超时后再发起下一个会 话,在BC端就可以控制整个总线的通信顺序和 确定故障节点,确定性高。双链路冗余传输,系 统可靠性高。	采用双点双线模式,线路断开会形成天线效应,致使数据传输误码率高,降低系统可靠性。
时间同步误差	≤100 ns	≤1 µs	不支持
拓扑结构	星形、环形	总线	点对点



图 8 FC-AE-1553 总线验证系统 Fig. 8 FC-AE-1553 bus verification system

3.1.2 系统NC-NT总线通信功能

系统NC-NT总线通信功能由NC向各个NT发送控制指令来实现。

NC向NT1发送一个命令序列,该命令序列携 带NC希望NT1执行的指令信息。NT1接收到NC 发送的指令后,返回状态序列,通知NC成功接收 到控制指令。随后NC根据需要向NT2、NT3、 NT4等发送携带控制信息的命令序列并接收反馈 的状态序列。最终通过查看每个NT的上位机应用 程序接收指令情况验证系统NC-NT总线通信功能。 3.1.3 系统总线传输速率

系统总线传输速率支持 1.062 5 Gbps, 2.125 Gbps, 4.25 Gbps。在遥测系统正常的工作中,使用FC逻辑分析仪可以查看消息瞬时速率以及总线传输速率。

3.1.4 系统总线误码率验证

系统总线中的物理通信可靠性通过误码率测 试来进行验证。误码率测试的本质就是向光纤上 发送一串固定格式的数据,接着在将发送的数据 从光纤上接收回来,并比较两者的异同。如果完 全相同,则表明光纤通信正常,不存在误码;若 光纤通信异常,则说明发送数据与接收数据存在 数据不完全匹配的情况。误码率的计算采用公式 "误码率=(发送/接收异常数据)/(发送/接收数据总 数)",如果误码率在10⁻¹²以下,既是说每发送/接 收10¹²比特数据,误码出现个数小于1比特,表明 系统光纤传输较为可靠。

3.1.5 系统总线时间同步功能

系统总线时间同步用于将系统内的所有设备 的本地时间统一到遥测控制器(NC)的时间。通过 时间同步功能,整个系统就可以被人为划分为多 个独立的时隙,每个独立的时隙执行不同的通信 内容,因此也就避免了系统在通信时可能存在的 紊乱情况。

首先,NC将本地时间通过FC原语时间同步功 能同步至网络交换机;其次,网络交换机在将从NC 接收到的时间信息同步至与该网络交换机互联的NT 中;最后,NC的时间就与NT的时间达成统一。

为了验证上述功能,我们将NC的本地时间以及NT本地时间从硬件设备上接出,然后使用示波器比较时间同步前以及时间同步后两者的相对时间关系。

3.1.6 系统总线 A/B 双总线通信功能系统

系统总线采用A/B双路通信功能进一步保障通 信的可靠性。A/B两路光纤在正常工作时,发送同 样的数据,若是从两路上接收到同样的数据,则 冗余一路数据,将另外一路数据作为有效数据使 用。采用A/B双总线进行通信,即便其中一路出现 异常时,只要另外一路正常,通信也能成功。

验证流程如下:

先将系统正常工作于 A/B 路双总线通信状态 下,断开 A 路总线,观察通信情况;接着接上 A 路 总线,观察通信情况;随后断开 B 路总线,观察通 信情况;最后接上 B 路总线,观察通信情况。上述 四步操作,每一步完成后观察通信的情况都应该 是通信正常的。

3.2 FC-AE-1553 总线验证系统测试结果

3.2.1 系统NT-NC总线通信功能验证结果

在NC生成NT→NC的消息,NC发送一个送至 NT1的命令帧,NT1接收到命令帧后就会向NC返 回一个状态帧(携带数据),表示此次数据采集完成。 紧接着NC依次采集NT2、NT3、NT4的数据,通过 FC协议分析仪查看FC数据通信情况,如图9所示。

	Sta	rt Time	Relati	ive Tim	e	Port	speed	S_ID		D_ID	Frame	Э
	925.57	5.810 (ms)	4	(ns)	->	P1	2 G	030000	0	030001	AE1553_	CMD
	925.59	3.428 (ms)	4	(ns)	-	P1	2 G	030001	C	30000	AE1553_S	TATUS
Sta	irt Time	Relative Ti	me	Port	Spee	s S	_ID	D_ID		F	rame	
925.57	75.810 (ms)	4 (ns)	→	P1	20	03	0000	03000	1	AE1	553_CMD	
925.59	3.428 (ms)	4 (ns)	-+	P1	2 0	03	0001	03000	0	AE158	3_STATUS	

图9 系统NT-NC总线通信功能协议分析图

Fig. 9 System NT-NC bus communication function protocol analysis diagram

3.2.2 系统NC-NT总线通信功能验证结果

在 NC 生成 NC→NT 的消息, NC 发送一个送 至测量终端的命令帧(携带数据), NT1 接收到命令 帧后会返回一个状态帧,表示此次消息通信完毕。 紧接着NC依次向NT2、NT3、NT4发送数据,通 过FC协议分析仪查看通信情况,如图10所示。

	Start Time	Relative Time	Port	Speed	S_ID	D_ID	Frame
	913.106.314 (ms)	0 (ns)	→ P1	2 G	030000	030001	AE1553_CMD
	913.116.347 (ms)	10.032 (us)	⇒ P1	2 G	030001	030000	AE1553_STATUS
1							-

图10 系统NC-NT总线通信功能协议分析图

Fig. 10 System NC-NT bus communication function protocol analysis diagram

3.2.3 系统总线传输速率验证结果

可以通过协议分析仪,查看到支持

1.062 5 Gbps, 2.125 Gbps, 4.25 Gbps, 如图 11 所示。



图11 系统总线通信协议分析速率图

Fig. 11 System bus communication protocol analysis rate diagram

3.2.4 系统总线误码率验证结果

在不同速率下,误码率测试时间≥24 h,误码率的结果<10⁻¹²,如图12所示。

3.2.5 系统总线时间同步功能结果

采用FC时间原语同步功能进行系统时间同步,FC协议分析仪查看时间同步流程,如图13 所示。



图12 系统总线通信误码率测试图



Start Time	Relative Time		Port	Speed_ID_II Frame	Frame	Command	Summary
344.811 (us)	0 (ns)	4-	P2	2 G	SYNx		CS_X1=0xE0; CS_X2=0x84
344.832 (us)	21 (ns)	4-	P2	2 G	SYNy		CS_Y1=0x23; CS_Y2=0x81
344.850 (us)	17 (ns)	4-	P2	2 G	SYNz		CS_Z1=0x04 ; CS_Z2=0xC5
1.344.818 (ms)	999.968 (us)	4-	P2	2 G	SYNx		CS_X1=0xE0; CS_X2=0x84
1.344.840 (ms)	21 (ns)	4-	P2	2 G	SYNy		CS_Y1=0x23; CS_Y2=0x80
1.344.857 (ms)	17 (ns)	4-	P2	2 G	SYNz		CS_Z1=0x66 ; CS_Z2=0xA9
2.344.830 (ms)	999.972 (us)	4-	P2	2 G	SYNx		CS_X1=0xE0; CS_X2=0x84
2.344.847 (ms)	17 (ns)	4-	P2	2 G	SYNy		CS_Y1=0x23; CS_Y2=0x7C
2.344.868 (ms)	21 (ns)	+	P2	2 G	SYNz		CS_Z1=0xC5; CS_Z2=0x81

图13 系统总线通信时间同步分析图

Fig. 13 System bus communication time synchronization analysis diagram

通过示波器查看两个设备间在时间同步后的 误差小于100 ns,如图14所示。





Fig. 14 System bus communication time synchronization error diagram

3.2.6 系统总线A/B双总线通信功能验证结果

首先NC正常工作于A/B路双总线通信状态 下,随后断开A路总线,观察通信情况,未出现 失败的消息;接着重新连接A路总线,观察通信 情况,同样并未出现失败的消息,如图15 所示。

随后断开B路总线,观察通信情况,未出现失败的消息;最后接上B路总线,观察通信情况,还 是未出现失败的消息,如图16所示。

由于FC-AE-1553采用双路A/B热冗余,两路 总线同时在发送,同时在接收,无需切换。接收 端采用先到先得的策略。如果先到的有错误,则 采用后面收到的数据。如果后面的数据也有错误, 则数据丢失。

									1.0 1.0 mm size								
话调	<u>関</u> 表								SESSTO	4× 8 8008	138	OR ADDR O	THER STRATE	NOTE CODE	CARDID R. LINTER	aw ca	0110177
5852 HC-38 ORC 3	I (030101) 12 I (03) 12	B Cal	515_ALINE 0	0 0.0	1 2002_0008 U	000 ss 04	as an	0	1 JC-34T (0 1 (3C_4T_0	30101) 0) 120	0×1	04	0	0.0	1010us	Ons	
NT (03	0101)->#C 15	8 0x1	Del	0	1	0051 01	*1	0	2 NT (03010	1)-HC 128	0×1	0.	0	0:0	1010 m	0n1	
								•									
使会	适 易入親親	法 保存道理表	0 62 44	lexheid (f	山谷榆 二 満	19 下发会活	舌 发送常急	会话	历史会话][导入调度	表 保存调度表	创建会话	周动会话	停止传输	- 南徐] [下	发会话	发送某急
tette	b/€							\leq	(完成金)								
0,001,0	NUMBER	TIMESTANP (as)	STATUS	NOCK	128	STIR ADIG.	IEL		70/0425 -	NUMBER	TIMESTARF (ps)	STATIES	M003	1.08	SUB	ADIR	1814
				NT-347 0301013		-											15us
683	66963	190.304.631.400	Ind	OF N7 001	128	De1	16us		2240 150	240	412.435.532.000	End	81.0001013->	PMC 128	0x1		
663 664	56563	190.304.631.400 190.307.289.200	Ind Ind	(SC_HT_00) HT ()30101)->NC	128	Del Del	16us 15us		2240 150 2241 150	1240	412.435.532.000	Rad Rad	8T (030101)-> 8C+>8T (03010 00 8T 00)	010) 128	0x1		1.6101
63 64 65	56563 56564 56565	190, 304, 631, 400 190, 307, 289, 200 190, 309, 947, 000	Ind Ind Ind	380_87_00) 87 (030101)-380 80-387 (030101)	128	Del Del	16us 15us 18us		2240 150 2241 150 2242 150	1240	412.435.502.000 412.438.239.800 412.440.097.600	End End	87 (000101)-3 87-387 (03010 (90_87_00) 87 (030101)-3	98C 120 01) 128 98C 128	0x1		16m
663 664 665	56563 56564 56565 56566	190. 304. 631. 400 190. 307. 289. 200 190. 309. 947. 000 190. 312. 604. 600	Ind Ind Ind Ind	080_87_00) HT (030101)->80 80_987_000 80_87_00) HT (030101)->80	128 128 128	Del Del Del	18us 15us 18us		2240 150 2241 150 2242 150 2243 150	240 241 242 243	412, 435, 532, 000 412, 438, 230, 800 412, 440, 897, 600 412, 443, 555, 400	End End End	NT (030101)> NC->NT (03010 (NC_NT_00) NT (030101)> NT (030101)>	98C 120 11) 128 98C 128 11) 128	0x1 0x1 0x1		160x 150x
63 64 65 65	56563 56564 56565 56566	190, 304, 631, 400 190, 307, 299, 200 190, 308, 947, 000 190, 312, 604, 600	Ind Ind Ind Ind	380_HT_00) HT (030101)->80 BC->HT (030101)->80 BC-MT (030101)->80 HT (030101)->80 HT (030101)->80	120 128 128 128	0e1 0e1 0e1 0e1	16us 15us 16us 15us		2240 150 2241 150 2242 150 2243 150	240 241 242 243	412, 435, 502, 000 412, 438, 230, 800 412, 440, 897, 800 412, 443, 555, 400	Rad End End	8T (000101)-3 8T5-38T (03010 38T_030101)-3 8T (030101)-3 8T_38T (030101)-3 8T_38T (030101)-3 8T_38T (030101)-3	98C 120 11) 128 98C 128 11) 128 11) 128	0x1 0x1 0x1 0x1		1604 1505 1505
663 665 665 665	56563 56564 56565 56566 56566	190, 304, 631, 400 190, 307, 289, 200 190, 309, 947, 000 190, 312, 604, 600 190, 315, 282, 600	Ind Ind Ind Ind Ind	300_HT_000 HT (030101)->NC MC_>HT (030101) MC_>HT (030101) MC_>HT (030101) MC_HT_000 MC_HT_000 MC_HT_000	128 128 128 128 128 128	Del Del Del Del Del	18us 15us 18us 18us 18us		2240 150 2241 150 2242 150 2243 150 2244 150	240 241 242 243 244	412, 435, 502, 000 412, 438, 230, 800 412, 440, 897, 600 412, 443, 555, 400 412, 446, 213, 200	Rad Ind Rad Rad	87 (030101)> 875->87 (03010 (05_87_00) 87 (030101)> 87 (030101)> 87 (030101)> 87 (030101)> 87 (030101)>	98C 120 11) 128 98C 128 11) 128 98C 128 98C 128	0x1 0x1 0x1 0x1 0x1		16m 15m 15m 15m
663 664 565 566 568	50563 56584 56585 56585 56585 56586 56586	190, 304, 631, 400 190, 307, 289, 200 190, 309, 947, 000 190, 312, 604, 600 190, 315, 262, 600 190, 317, 920, 400	Ind Ind Ind Ind Ind	'BC_HT_00) HT (030101)->80 HC (030101)->80 BC_HT_000 HT (030101)->80 HT (030101)->80	128 128 128 128 128 128 128 128	Del Del Del Del Del	18us 18us 18us 18us 18us 18us		2240 150 2241 150 2242 150 2243 150 2244 150 2244 150 2244 150	290 291 292 293 293 294	412, 435, 532, 000 412, 435, 532, 000 412, 440, 997, 600 412, 440, 997, 600 412, 443, 535, 400 412, 445, 213, 200 412, 446, 971, 000	End End End End End	87 (000101)3 87387 (00010)3 87 (000101)3 87387 (00010 387 (00010)3 87 (000101)3 87 (00010)3 87 (00	98C 120 11) 128 98C 128 11) 128 98C 128 11) 128 11) 128	0x1 0x1 0x1 0x1 0x1 0x1 0x1		16m 15m 15m 15m 15m 16m

图15 NC断开A路总线后以及重新连接A路总线后通信图

Fig. 15 Communication diagram of the telemetry controller (NC) after the A bus is disconnected and the A bus is reconnected

	ort 0	fiet I							Pe	rt 0	Fort 1						
话课	周度表							\preccurlyeq	会话课	度表							_
SES	STON_NODE	LEN	SUD_ADDR	OTHER_STRAIDE	1002_CODE CI	HEDULE_INTERVA	CTCLICITS		SES	STOR_NODE	1153	SUD_ADDR	OTHER_SUBADDR	NOTE_CODE	CORDULE_INTE	EYA C	CUCLICI
30-> 00	NT (030101) NT (00)	128 Os		±0 Cx0	10	000us Oes		0	1 007	T 0050101.) E	28 0.eJ	01	d 0x	:0	1000 us	Des	
37 0	30101)->#C	120 06		a0 0a0	10	100us Des	5	0	2 NT 03	0101)->90 1	28 0.1	0	dQ Qa	10	1000 us	De-s	
τ. Έ	⇔ಚ್)[ವಸಿಗ	副名志 (保存:周名志	alskeif.	RUCHE G	ies a	12 15% #16	*****	, 	n≠≠	ia) [≣λia)	8志 【保存词除表】	自然会话	esteis e	ALL (#46)	#18	波会派] (war
历史 2 宏成	êiấ][尋λi 浍话	周浩太] [保存:周 음太) (1994-15	日本会話 「保」	止传输] [消]	AR 】 「下水会通) XXXX		(完成	afa] (导入)闲 会话	8志] 【作存词晚表】	00#24	自动会话	私止传输] [₩ \$	发会话) (X20
の史は	eia 日本 会话 SWBEI	和自主。」(以下:明言主 TIMESTAND Gas	参議会話 STATUS	B动会话 (A) WOE	11.69.5%) (H) 11.05	4条 下发会话 S10_A008	(表記:案急)		の史金	alia (写入词) 会话 NAMDER	R本】 【休存词R表 TURSTAR (55)	86社会话 STATUS	自动会话 P	8止传输 LLS	7 (188 510,	·发会话 _ADD2.	832
あた 完成 371	≘i話 】 (早入i 会话 800088 172371	NRA CRITINEA TIMESTAR Gas 41. 758. 624. 200) 教練会話 STATUS End	●共会話 例3 WOE RC->HT (200101) (37.3月.20)	LES 128	林 下放会通 SUD_ALOR Ort	发送菜油 DELA Liters		历史至 (完成 1578	සේ දිවැමි සැයි හැඟවනය 205578	E本 代存词形表 TINESTATE (as) 140, 647, 388, 600	10日本語 STATUS End	自动会话 9 NODE NT (050101)->N	841-6548	兼称 7 500. Cz1	·发会话 _ADDE	3505 1515
また また成 371 372	書語 (尋入) 会話 SUREEN 172371 172372	 「秋田子県日本市 TIMESTAMP Gas 41. 158. 624. 000 41. 751. 282. 000 	STATUS End	●社会話 例3 WOE RC-3HT (020101) (35_JEL_00) FT (020101)3HC	L (65) H	数	DELA DELA 15us		())史垂 ()完成 1578 1579	195日 - 第入1第 会社名 NUMBZR 2019578 2019579	E本 依存词換表 TIMESTATE (as) 140. 647. 385. 600 140. 650. 048. 600	19日本語 STATUS End End	自动会话 9 W002 FT (020101)->34 FT (020101)->34 FT (020101) (010)FT (020101)	ALE (548)	#\$\$ 7 510, Cal	、发会话 _ADDR	15us 15us
周史4 完成 371 372 373	自通 (早入) 会话 172311 172312 172313	 「日本市通知素」 「日本市通知	STATUS End End	●均金括 第月 NOE RC-NT (00101) (57.3TL90) FT (00101)->NC RC-NT (00101) (57.9TL90)	LINN 128 128 128	数 SUD_AUDR Del Del Del	東京会会 DELA 15es 15es		D決全 完成 1578 1579 1580	 (写入)第 会社名 NUMBER 2019719 2019759 2019550 	E主 保存現代表 110ESTATE (as) 140.647.385.603 140.650.048.603 140.652.704.403	創建会活 STATUS End End End	自动会話 9 NODE NT (000101)-38 NC-38T (000101) 000_8T_000 3T (000101)-389	LEF C 128 128 C 128 128 C 128	#18 7 510 0x1 0x1	、发会话 _ADDE	15cs 15cs 15cs
市成 完成 371 372 373 374	 会議 第346 第3468 第3468 172371 172372 172373 172373 172374 	 【第年前発表】 TEMESTAND Gas 41. 158. 624. 200 41. 151. 282. 200 41. 153. 539. 800 41. 153. 539. 800 	Billithia STATUS End End End End	 B均会話 第3 NOE RC-3FT (030101) (75,3FT,000) FT (030101)-39C RC-38T (030101)-39C RC (030101)-39C RT RT (030101)-39C RT RT RT	L (6%) (H) 128 128 128 128	#第 下放会通 SUD_AUDR Del Del Del	DELA DELA Lões Lões Lões		的史重 (完成 1578 1579 1500 1581	 (写入)第 会社名 HURDER 2019578 2019579 2019580 2019580 2019580 	E. (1477) (148) TINESTATE (243) 140, 647, 355, 603 140, 653, 048, 603 140, 655, 352, 200 140, 655, 352, 200	総統会議 STATUS End End End End	自动会話 9 NOZ FT (020101)->39 NC-SFT (020101) SC-SFT (020101) NC-SFT (020101) NC-SFT (020101)	Richtik 125 2 125 128 128 128 128 128 128	#18 P	ADDR	3500 15cs 15cs 15cs
市成 可能 371 372 373 374 375	 会話 気入 会話 804683 172311 172312 172313 172314 172315 	Image: Control of the state Image: Control of the state <t< td=""><td>BBRAIS STATUS End End End End End End</td><td>B均金減 例3 NOE NOE</td><td>LEGAN HI</td><td>#2: TSX会は話 SU0_A008 Occ1 Occ1 Occ1 Occ1 Occ1 Occ1 Occ1 Occ1</td><td>DELA 18es 15es 15es 15es 15es</td><td></td><td>防史至 完成 1578 1579 1500 1581 1582</td><td> (写入)第 会)(否) (日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)</td><td>E. (177)485</td><td>総領土会議 STATUS End End End End End End</td><td>日本地会話 9 NOOZ NT (020301)-239 NT (020301)-239 NT (020301)-239 NT (020301)-239 NT (020301)-239 NT (020301)-239</td><td>Bill(fill) LEF 0 128 1 128 0 128 1 28 0 128 0 128 0 128 0 128</td><td>#18 T</td><td>ACCE</td><td>1548 1548 1548 1548 1548</td></t<>	BBRAIS STATUS End End End End End End	B均金減 例3 NOE NOE	LEGAN HI	#2: TSX会は話 SU0_A008 Occ1 Occ1 Occ1 Occ1 Occ1 Occ1 Occ1 Occ1	DELA 18es 15es 15es 15es 15es		防史至 完成 1578 1579 1500 1581 1582	 (写入)第 会)(否) (日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)	E. (177)485	総領土会議 STATUS End End End End End End	日本地会話 9 NOOZ NT (020301)-239 NT (020301)-239 NT (020301)-239 NT (020301)-239 NT (020301)-239 NT (020301)-239	Bill(fill) LEF 0 128 1 128 0 128 1 28 0 128 0 128 0 128 0 128	#18 T	ACCE	1548 1548 1548 1548 1548
的史。 完成 371 373 374 375 376	 会話 (昇入) (月) (月)	(第2年前日本)、 (第2年前日本) (第2年前年) (第2年前日本) (第2年前日本) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前年)) (第2年前)) (第2年前年)) (第2年前)) (第2年前)) (第2年前)) (11年前)) (11年前)) (11年前))	BBR±id STATUS End End End End End End End End End	KO2	LES LES 128 128 128 128 128 128 128 128 128 128	また。	DELA LSes LSes LSes LSes LSes LSes		防史至	 第入議員 第入議員 第1番 第1番<!--</td--><td> 株子词根太、 TIMESTAFC (a.s.) 140. 647. 398. 603 140. 650. 648. 603 140. 652. 704. 403 140. 655. 3562. 200 140. 655. 7562. 200 140. 655. 757. 600 </td><td>記録金述5 STATUS End End End End End End</td><td>自动会話 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10</td><td>LL:F64k LEF 0 128 0 128 0 128 0 128 0 128 0 128 0 128 0 128 0 128</td><td>#18 P</td><td>ADDE</td><td>3500 1505 1508 1508 1508 1508</td>	 株子词根太、 TIMESTAFC (a.s.) 140. 647. 398. 603 140. 650. 648. 603 140. 652. 704. 403 140. 655. 3562. 200 140. 655. 7562. 200 140. 655. 757. 600 	記録金述5 STATUS End End End End End End	自动会話 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	LL:F64k LEF 0 128 0 128 0 128 0 128 0 128 0 128 0 128 0 128 0 128	#18 P	ADDE	3500 1505 1508 1508 1508 1508
的史。 完成 371 373 374 375 374 375	 会話 第30日日 第70日日 第71日日 第71日 第71日 第71日 第71日 第71日日 第71日 第71日 第71日 第71日<td>(株式) (株式用金式) TURETARE Gas. 41, 158, 624, 200 41, 158, 624, 200 41, 158, 529, 200 41, 158, 599, 500 41, 156, 597, 500 41, 177, 913, 200 41, 177, 913, 200 41, 177, 971, 300</td><td>STATUS End End End End End End End End End End</td><td>KNOE FX-3FG (2010) - 3FG FX-3FG (2010) - 3FG FX (2010) - 3FG FX</td><td>LES 128 128 128 128 128 128 128 128 128 128</td><td>また。 また。 また。 また。 また。 また。 また。 また。 また。 また。</td><td>DELA Idea Idea Idea Idea Idea Idea Idea Idea</td><td></td><td>均更差 (完成 1578 1579 1500 1581 1583 1583 1584</td><td> 第二人前 第二人前 第一人前 第一人前 第一人前 第二人前 第二人前</td><td>EL (%7-148.5.) 140.007.395.003 140.053.045.003 140.053.055.002.000 140.053.052.001 140.053.052.000 140.050.077.000 140.053.355.000</td><td>20歳金減5 STATUS End End End End End End End</td><td>自然地会話 9 N002 N1050001-339 N55747(03001)-339 N55747(03001)-339 N55747(03001)-339 N55747(03001)-339 N55747(030101)-339 N55747(030101)-339 N55747(030101)-339 N55747(030101)-339</td><td>LL:F64k LES 0 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128</td><td>**** P</td><td>《发会话 _AIOR</td><td>3533 1545 1548 1548 1548 1548 1548</td>	(株式) (株式用金式) TURETARE Gas. 41, 158, 624, 200 41, 158, 624, 200 41, 158, 529, 200 41, 158, 599, 500 41, 156, 597, 500 41, 177, 913, 200 41, 177, 913, 200 41, 177, 971, 300	STATUS End End End End End End End End End End	KNOE FX-3FG (2010) - 3FG FX-3FG (2010) - 3FG FX	LES 128 128 128 128 128 128 128 128 128 128	また。	DELA Idea Idea Idea Idea Idea Idea Idea Idea		均更差 (完成 1578 1579 1500 1581 1583 1583 1584	 第二人前 第二人前 第一人前 第一人前 第一人前 第二人前 第二人前	EL (%7-148.5.) 140.007.395.003 140.053.045.003 140.053.055.002.000 140.053.052.001 140.053.052.000 140.050.077.000 140.053.355.000	20歳金減5 STATUS End End End End End End End	自然地会話 9 N002 N1050001-339 N55747(03001)-339 N55747(03001)-339 N55747(03001)-339 N55747(03001)-339 N55747(030101)-339 N55747(030101)-339 N55747(030101)-339 N55747(030101)-339	LL:F64k LES 0 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128 1 128	**** P	《发会话 _AIOR	3533 1545 1548 1548 1548 1548 1548

图16 遥测控制器(NC)断开B路总线后以及重新连接B路总线后通信图

Fig. 16 Communication diagram of the telemetry controller (NC) after the B bus is disconnected and the B bus is reconnected

4 结束语

随着时间的推移以及科技的进步,以往的遥测系统所使用的通信协议受制于传输速率、物理 拓扑体积等原因已经渐渐地越来越难满足现代遥 测系统要求的高传输速率、高带宽、低延迟、物 理拓扑体积小等需求。本文在上述背景下对基于 FC-AE-1553总线的新一代运载火箭遥测系统进行 了方案设计,并通过实际工程应用测试,验证了 FC-AE-1553总线在遥测系统中的应用情况,实验 表明了基于FC-AE-1553总线的遥测系统的一系列 性能指标(传输速率、可靠性、稳定性以及实际物 理拓扑体积等)都有了明显提升。

参考文献

- [1] ALAN F. BENNER. 存储区域网络光纤通路技术[M]. 胡先志,译. 北京:人民邮电出版社, 2003: 11-28.
- [2] 宁亚锋.光纤通道在航空电子环境的应用及关键技术 研究[J].科技经济导刊, 2018, 26(33): 58.
- [3] 杨建茜, 王世奎, 闫海明. 机载 SMS 高速 FC 网络通信协议的仿真与分析[J]. 航空计算技术, 2018, 48(5): 296-300, 304.

YANG Jianxi, WANG Shikui, YAN Haiming. Simulation and analysis of high fiber channel network communicaton protocol in airborne stores management system[J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(5): 296-300, 304.

- [4] ANSI INCITS. Fibre Channel-Avionics Environment(FC-AE)(Rev3.5)[S]. [2023-11-08].
- [5] ANSI TR-NCITS. xxx-200x Fibre Channel Avionics Environment-Upper Layer Protocol MIL-STD-1553B Notice 2(FC-AE-1553)[S]. [2023-11-08].

- [6] 郭志君.基于 FPGA 的航空电子光纤通道接口卡的研究[D].成都:电子科技大学, 2011.
- [7] 李芃博.FC航空电子测试接口的研究与实现[D].西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [8] 鞠铭阳,张利洲,王世奎.FC-AE-1553协议分析与研究[J].现代电子技术,2016,39(11):21-23,29.
 JU Mingyang, ZHANG Lizhou, WANG Shikui. Analysis and research of FC-AE-1553 protocol[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(11): 21-23, 29.
- [9] 王世奎,张利洲,焦龙.飞机悬挂物FC网络标准研究与 关键技术分析[J].电光与控制,2017,24(9):50-53.
 WANG Shikui, ZHANG Lizhou, JIAO Long. FC network standard of aircraft/store and the key technologies[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(9): 50-53.
- [10] 车明,周东. PON型FC-AE-1553网络的分层节能设 计[J].高技术通讯, 2015, 25(6): 575-583.
 CHE Ming, ZHOU Dong. Layered energy-efficient design of PON type FC-AE-1553 networks[J]. Chinese High Technology Letters, 2015, 25(6): 575-583.
- [11] 杜玲,廖小海.FC-AE-1553 总线在箭载测量系统中应用研究[J].遥测遥控, 2015, 36(5): 33-43.
 DU Ling, LIAO Xiaohai. Research on FC-AE-1553 bus on rocket-bornt test system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(5): 33-43.
- [12] 朱浩文,杨凌云,张震,等.基于ABTS协议的FC-AE-1553交换管理模块研究与实现[J].计算机测量与控制, 2019, 27(5): 164-168.
 ZHU Haowen, YANG Lingyun, ZHANG Zhen, et al. Research and implementation of FC-AE-1553 bus exchange management module based on ABTS protocol[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(5): 164-168.
- [13] 王亘,周海洋,金泰印,等.FC-AE-1553网络互连控制

WANG Gen, ZHOU Haiyang, JIN Taiyin, et al. Design and application of FC-AE-1553 bus network interconnection control system[J]. Integrated Circuits and Embedded Systems, 2022, 22(5): 57-61.

- [14] ZHAN Y, WANG L, WU S, et al. Dynamic bandwidth allocation for switching FCAE-1553 network in avionics system[C]//2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2018: 709-713.
- [15] 高润莲,周晴.基于光纤通道数据收发系统的设计与 实现[J].电子设计工程,2018,26(2):189-193.
 GAO Runlian, ZHOU Qing. Design and implementation of fibre channel data transceiver system[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(2):189-193.
- [16] 曹素芝, 房亮, 吴少俊, 等. 总线型 FC-AE-1553 网络结构及实时性分析[J]. 半导体光电, 2014, 35(5): 858-861.
 CAO Suzhi, FANG Liang, WU Shaojun, et al. A bus network topology structure of FC-AE-1553 and real-time analysis[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(5): 858-861.
- [17] 房亮,赵光恒,曹素芝.FC-AE-1553网络传输性能评价[J].北京航空航天大学学报,2015,41(8):1396-1402.

FANG Liang, ZHAO Guangheng, CAO Suzhi. Evaluation of network transmission performance in FC-AE-1553[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(8): 1396-1402.

[18] 王报华, 郝现伟, 王昕, 等. FC-AE-1553 光纤总线技术 在运载火箭测量系统的应用[J]. 导弹与航天运载技 术, 2023(2): 137-140.

WANG Baohua, HAO Xianwei, WANG Xin, et al. Application of FC-AE-1553 optical fiber bus technology in launch vehicle measurement system[J]. Missiles and Space Vehicles, 2023(2): 137-140.

[作者简介]

郝现伟	1985年生,	博士,高级工程师。
王报华	1988年生,	硕士,高级工程师。
涂晓东	1970年生,	副教授,硕士生导师。
王昕	1983年生,	硕士,高级工程师。
谢军	1970年生,	副教授,硕士生导师。
王阳硕	1991年生,	硕士,工程师。
李 明	1986年生,	硕士,工程师。

(本文编辑:杨秀丽)