

PON 型 FC-AE-1553 网络的分层节能设计^①

车 明^② 周 东^③

(电子科技大学电子科学技术研究院 成都 611731)

摘要 为了满足航空电子设备组网应用于光纤通道(FC)航空电子环境(AE)时对网络系统低功耗的要求,提出了一种面向 FC-AE-1553 协议的无源光网络(PON)型网络的分层节能设计模型,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。该方案利用了 PON 型拓扑的低功耗特点,并根据拓扑结构和协议特点设计相应的节能措施,同时在链路层设计半睡眠节能机制和全睡眠节能机制。对该节能方案的实际性能以及对其影响因素进行了理论分析和试验测试,得出的结果表明,采用所提出的三层节能措施之后,航空电子网络终端的功耗降低了 79%。这种采用网络分层的低功耗设计对于航空电子网络的节能设计具有很好的启示。

关键词 节能, FC-AE-1553, 无源光网络(PON), 光纤通道, 睡眠, 光收发模块, 时延

0 引言

面对航空电子系统结构的模块化、综合化、开放式设计趋势^[1],美国国家标准协会(ANSI)制定了高带宽、低延迟、良好扩展性的光纤通道(fibre channel, FC)技术^[2]。为了更好地满足在航空航天领域中复杂且苛刻的空间环境需求和强实时、高可靠的系统互联要求,ANSI 专门成立了研究将 FC 技术应用在航空电子环境(avionics environment, AE)的航空电子分委员会(ANSIFC-AE),目前已制定了 5 种协议规范^[3],而 FC-AE-1553 协议便是其中之一。

FC-AE-1553 协议可以将传统的 MIL-STD-1553 航电协议映射到高宽带的 FC 网络中,从而生成低开销、高确定性的宽带容量协议^[4]。它不但能通过桥接方式兼容原有设备,又能提高接入网络节点数,增加消息传输最大数据量。FC-AE-1553 协议能支持与 FC 协议相同的点对点(point-to-point)、仲裁环(arbitrated loop)和交换式(fabric)三种拓扑结

构^[4,5],然而当这些拓扑结构应用于航空航天飞行器系统时,其结构复杂、成本昂贵、维护麻烦、功耗较高的缺点就变得尤为突出。取得性能与功耗之间的平衡点,是实现航空电子设备组网节能设计的关键^[6]。为此,国内外专家提供了一些解决方案。Chennu 等提出了 HUB 环^[7]结构,Howang 等提出了双向环^[8]结构,这些拓扑结构能在一定程度上降低仲裁环拓扑的消息时延,但是仍具有协议复杂、功耗较高的缺点。2011 年,中国科学院的张善从研究员率先提出了一种基于 FC-AE-1553 协议的无源光网络(passive optical network, PON)型拓扑结构,该结构通过使用无源光分路器代替光纤通道交换机,使其相对于协议标准的三种拓扑结构具有结构简单、功耗较低、价格低廉的特点^[9],文献[10]对该拓扑结构的实时性进行了分析。电子科技大学宗竹林团队又针对 FC-AE-1553 协议的 PON 型拓扑结构,利用 OPNET 进行了系统建模仿真,进一步验证了协议在该拓扑结构下传输的可靠性和稳定性^[11],其后又对该 PON 型拓扑节点设计了一种内存管理架构,基

^① 航空科学基金(20090580013, 20110580002)和中央高校基础研究基金(ZYGX2009J092)资助项目。

^② 男,1986 年生,硕士;研究方向:机载高速数据总线等;E-mail: eyerobot710@sina.com

^③ 通讯作者,E-mail: up_moving@163.com

(收稿日期:2014-12-31)

于该双缓存存储的设计方案能有效提高存储访问效率,减少数据转发延迟时间,降低系统传输功耗^[12]。最近该团队又针对此方案设计的协议芯片,提出了一种基于寄存器传输级(RTL)的组网验证方法^[13]。以上文献对 FC-AE-1553 协议应用于 PON 型拓扑结构做了大量的设计和验证工作,但对该网络拓扑的功耗控制方面的系统性研究却较少。为此,IBM 针对 FC-EE 设计,即 FC 协议的节能(energy-efficient, EE)设计,提出了一些指导性的意见^[14]。为了实现一般光网络的节能,业界提出:首先尽量降低设备的复杂度,采用高能效的元器件,从而提高网络设备的能量利用率^[15];其次尽可能关闭链路中正处于闲置状态的资源,或者使这些资源进入一种低能耗模式^[16,17];最后在宏观上采取一些低功耗的业务和路由算法设计,在服务性能可接受的情况下,强调动态自适应地处理网络性能与能量节约之间的关系,使网络能自动感知和调节流量或负载等需求^[18,19]。当然这些节能技术并不是相互独立的,而是相互交叉并有机地联系在一起,从而针对具体需求获得一种综合全面的节能方案。所以,本文针对 FC-AE-1553 协议的 PON 型拓扑结构,提出了一种三层网络节点设计模型,同时设计了一种面向网络分层的节能设计方案,并在网络链路层提出了两种基于睡眠的节能机制,最后通过试验分析了该节能方案对于网络时延、光收发器以及控制算法的影响。综上可以得出,该节能设计方案能进一步降低 PON 型拓扑结构下的航空电子系统的功耗。

1 PON 型拓扑结构介绍

一种基于 FC-AE-1553 协议的 PON 型网络拓扑结构设计如图 1 所示,该拓扑结构中通过使用无源光分路器(optical passive splitter, OPS)连接一个网络控制器(network controller, NC)和多个网络终端(network terminal, NT),并使用一对多的通信方式。网络控制器是整个网络的控制核心,负责网络终端的传输请求查询、总线同步、数据传输协调以及错误处理和数据备份传输等功能。网络终端通过无源光分路器与网络控制器连接来实现网络终端与网络控

制器、网络终端与网络终端之间的通信传输功能。无源光分路器负责执行光信号的下行分配和上行汇聚与传输功能,上下行传输使用双无源光分路器,利用两路光纤实现上下行信道隔离,分别传输上行数据和下行数据。

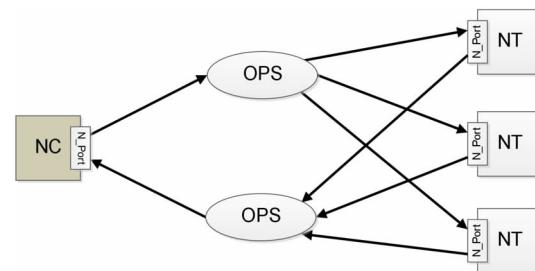


图 1 FC-AE-1553 协议的 PON 型拓扑结构图

该网络拓扑在继承了传统光纤通道技术高带宽、高可靠性的优良传输特性的同时,又由于其无源光分路器的无源特性,使得该拓扑结构相比于交换式网络拓扑具有非常低的功耗^[20]。其次,该拓扑结构简单,容易隔离失效节点,并具有较强的抗辐射性能、良好的实用价值,使其更能满足未来航空航天工程的需要。

2 PON 型拓扑节能设计

在构建该网络拓扑结构的节点时,由于目前业界存在的光纤通道协议栈相关的专用集成电路(ASIC)芯片和 IP 核等实现程度并不一样,也并不严格遵循光纤通道(FC)协议栈的 5 层模型^[21],故本文在现有开发平台的基础上,将网络节点的实现按照协议功能的三个层次进行设计,分别是物理层、链路层和传输层,如图 2 所示。

(1) 物理层:从传输数据类型上来说,物理层主要实现传输字以下的数据收发和处理,完成光纤通道协议 FC-0 层和 FC-1 层的功能。在媒体接口 FC-0 层中,通过使用光收发模块(optical transceiver module)来实现光电转换的功能。串并转换(SERDES)模块实现了光纤通道协议 FC-1 层的传输编码功能,向下通过串行外设接口(SPI)收发高速的串行数字码流给光收发模块,向上通过 XAUI 接口提

供 32 位总线传输字给 FC-2 层处理,此方案通过 Xilinx 的低功耗吉比特收发器(GTX)实现该层功能,确保原始的比特数据可在光纤媒介上传输。

(2)链路层:主要实现数据有效可靠地从一端传送到另一端。该层向上提供 FC-2 层的 FC 帧,向下提供用于 FC-1 层 8B/10B 编解码的 32 位传输字。链路层一方面通过端口状态机在通信过程中建立链路并维护链路,另一方面,该层提供基于循环冗余校验(CRC)的检错机制和基于 R_RDY 原语信号的流量控制。

(3)传输层:则主要实现光纤通道协议的 FC-3 层和 FC-4 层,映射 FC-AE-1553 协议相关机制,实现序列及交换相应的处理,还定义了一些常用服务,如数据加解密、多播传输等服务。

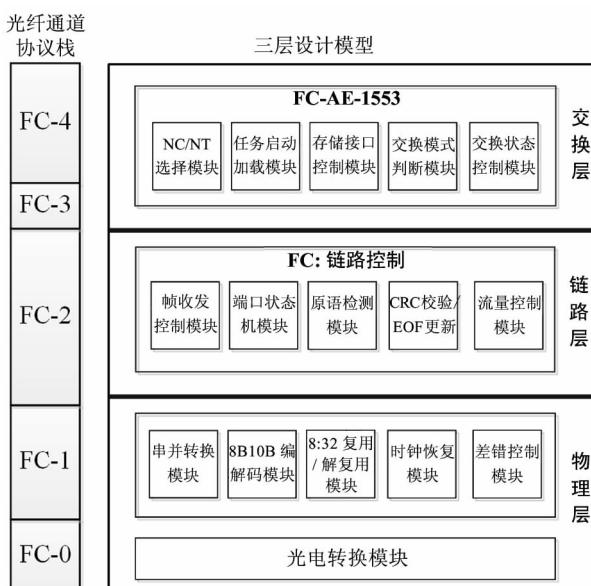


图 2 网络节点分层设计方案图

网络系统功耗的降低,可以在系统设计架构的所有层次上进行,但是随着设计层次的越往上,系统结构的抽象程度将越高,对于系统全局的功耗控制也更强。在越高的层次上采取相应的节能措施之后,往往能达到的节能效果也会越好^[22]。总体上来说,网络节能设计主要是通过物理电路设计(电路级和芯片级)、软件的编译优化(系统级)、网络拓扑结构的低功耗映射等不同层次来降低系统。

2.1 物理层节能措施

在网络物理层面主要依赖于硬件能效的提升,大规模集成电路高效信息处理能力的利用,高速串行接口电路的改进,超低功耗光收发器件、高效硬件的物理设计等来提高物理器件效率,降低网络设备能耗。

由于三层网络节点系统是由一个网络控制器和多个网络终端构成的网络,网络终端的能耗对整个系统的能耗影响很大,而网络终端很大一部分能耗来源于光收发器,有效降低光收发器的能耗将是物理层节能的关键。直接调制的分布反馈式激光器(DFB-LD)具有在高速调制下仍能保持动态单模的特性,特别适合高速短距离的光纤通信系统,它具有整体性能好、工作温度范围大、传输距离远等优点。激光器的波长对温度变化极为敏感,随着温度的上升,波长会发生漂移,同时激光器的电光转化效率会降低,从而导致能耗升高,因而对温度进行有效控制就能减少散热设备产生的额外功耗,而 DFB 激光器的发射波长随温度的漂移相对较小,有较高的边模抑制比,具有较高的功率转换效率。

随着激光器技术的发展,采用一些具有低功耗、高性能的激光器也是提高本拓扑网络节能效果的措施,如文献[23]就提到一种低功耗的 1.3 微米 InAs/GaAs 量子点激光器,它不但具有节能的优良特性,还具有成本低、温度稳定性高、可高速直接调制等优势。同时也可借鉴文献[15]提到的一种光噪声重用的方案,将光放大器所产生的自发辐射噪声作为自然泵浦源送入到掺饵光纤进行信号放大,在没有增加能源额外开销的情况下,增加了能源的使用效率。

该系统的核心控制芯片选用了 Xilinx 的 Virtex 系列低功耗版本,该系列集成低功耗吉比特收发器(GTX)硬核,并且工作在 GTX 内部的低功耗模式(low power mode, LPM)下,该模式支持低插损信道。除了串并转换模块的低功耗实现之外,其现场可编程门阵列(FPGA)的逻辑 Verilog 代码设计也应遵循一些低功耗设计原则,例如减少开关活动量,减少毛刺和流水作业,降低频繁开关转换信号的逻辑深度等一些措施^[24]。当系统中有高速大容量的数

据传输时,将会对内存 RAM 进行频繁的读写访问,在采用文献[12]所使用的存储器动态双缓存分块访问技术后,系统的平均功耗能够降低 33.32%,这种通过牺牲面积来换取功耗降低,能很好地应用于航电系统。

2.2 链路层节能措施

在链路层面则主要依赖于链路收发控制节能技术,其基本思想是网络节点在接收/发送空闲帧时,通过引入节点休眠模式,从而开启或关闭特定的功能模块来控制设备的能耗以实现节能。

在 FC-AE-1553 协议中,由于网络控制器是系统的核心控制设备,它除了需要发送和接收数据外,还有很多其他的功能控制模块,而且所有的网络终端都依赖于它的时钟来进行同步,若进入休眠模式后会引起很严重的系统时钟同步的问题,故在节能设计方面一般不将其列入节能计划中。随着网络终端接入的增多,其耗电量将会大大增加,若能有效优化网络终端的能量消耗,其数量远多于网络控制器的特点将决定在该拓扑结构下更具有节能优势。因此,本设计方案针对 PON 型拓扑结构的网络终端节点提出了半睡眠和全睡眠两种节能机制。

2.2.1 半睡眠机制

由于 FC-AE-1553 协议是基于命令/响应式的协议,在该无源星型拓扑结构中,只有当网络终端处于传输交换过程中,并且需要网络终端返回状态序列或者数据序列时,才开启该网络终端的光发射机及相应光发送控制模块,在网络终端没有上行数据交换状态下仅保持光接收机开启即可。网络终端节点仅在需要发送上行数据时才打开光发射机和相关的通信发送模块,其余时刻均关闭,这种方式称为半睡眠机制(half sleep mechanism, HSM)。

在网络终端节点的一次命令响应交换过程中,可能需要多次的上行数据的发送,为使链路能在降低能耗与减小同步延时之间取得平衡,在该半睡眠模式下,一旦交换过程需要为上行数据开启发射机,就只在该次交换传输过程结束时才关闭发射机,从而避免在一次命令响应过程中由于频繁开关发射机而导致同步延时。

处于半睡眠模式下,下行数据流量的时延不会

受到任何影响,但是上行数据流量会由于网络终端通信功能模块的开启及同步而产生额外的数据时延,整体时延的大小取决于上行数据交换的频度。

2.2.2 全睡眠机制

网络终端关闭包括光收发机在内的所有通信和服务模块,除了睡眠结束检测模块以外,网络终端只被本地事件激活,例如自动唤醒计时器超时等,这种方式称为全睡眠机制(deep sleep mechanism, DSM)。当网络终端收到睡眠消息后,则根据当前有无上行数据流量来决定其是否接受睡眠指令,若无,则同意睡眠,同时启动并维持一个睡眠结束检测模块,该模块包含一个本地计时器时钟,并在指定的激活时刻到来之前唤醒光收发模块,使网络终端在指定的上行首帧开始传输之前完成对网络控制器的同步。若此时仍有上行数据流量,则拒绝睡眠,直到数据传输任务结束。图 3 所示为网络终端的全睡眠状态转换图。

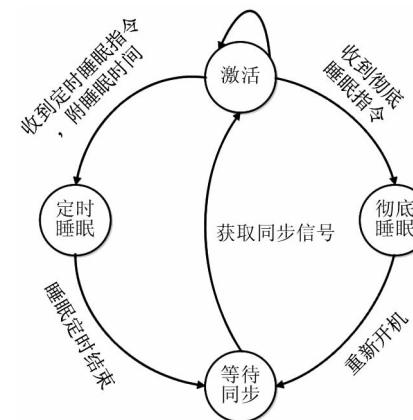


图 3 全睡眠机制 NT 状态转换图

为保证链路的可靠性,网络终端全睡眠时,网络控制器必须先缓存所有发往该网络终端的光纤通道帧,待网络终端醒来后再将帧下发给该网络终端,以保证网络终端不会额外丢失业务。

在满足特定条件的情况下,例如高优先级传感器捕获数据触发、周围条件改变以及设备警告信息激活时,这些睡眠终结信息在预设睡眠时间结束之前到来,根据消息优先级立即打开光收/发射机及必要的通信和控制模块,网络终端提前结束睡眠模式回到正常模式工作。当网络终端回到正常模式工作

以后,网络控制器可以通过命令序列表自动检测到状态的变化,使网络控制器和网络终端之间重新建立数据链路,然后将缓存中的用户数据尽快交换传输^[25]。提前唤醒机制可以尽量减小高优先级数据的时延,在达到节能的目标的同时,也尽量保证网络系统的时延性。

为了能在全睡眠模式下,网络终端也能及时响应网络控制器发送过来的非周期性突发消息,网络终端节点应该具备一种周期性的等待唤醒机制,如图 4 所示。在这种机制下,处于全睡眠模式下的网络终端节点应周期性地被唤醒,节点被唤醒后处于一种低功耗的半睡眠模式中,首先应该监听和检测是否有网络控制器发送的重要的突发消息需要处理,一旦满足所需要的优先级,则启动整个网络终端节点为工作模式,否则,则继续切换到全睡眠模式。这种机制并不能使得非周期的突发消息得到完全及时的响应,但却大大提高了网络系统的可靠性,从而取得了性能与功耗的平衡。响应的及时性在很大程度上取决于对全睡眠和监听检测的时隙分配,监听检测时隙分配过大会降低响应的实时性,而分配过小又会增加网络下行链路的同步所导致的时延和功耗等,所以应该针对具体的使用场景进行合理的设计。



图 4 周期性等待唤醒机制示意图

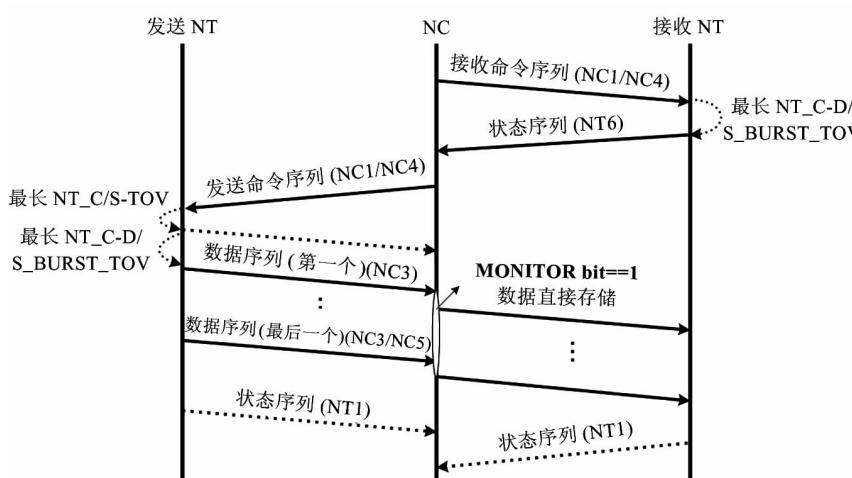


图 5 NT-NT 突发模式交换传输流程图

2.3 交换层节能措施

在交换层则依赖于对拓扑和协议的优化,主要针对光纤通道协议的 FC-4 层,也即 FC-AE-1553 协议层。由于 PON 型拓扑结构的使用,势必会引起 FC-AE-1553 协议 10 种传输交换模式的变化^[4],在该拓扑结构中,不仅仅因为无源光分路器的无源特性使得功耗大大下降,同时也可通过优化部分传输模式来降低系统功耗。

(1) 对于网络控制器-网络终端 (NC-NT) 模式 (写模式)、网络终端-网络控制器 (NT-NC) 模式 (读模式)、无数据字模式命令、有数据字模式命令 (发送数据) 和有数据字模式命令 (接收数据) 这 5 种常规传输模式,其特征是仅网络控制器与网络终端之间的数据交换,节点间的交换传输模式与协议标准拓扑结构下传输交换相似,而最大的区别在于协议栈链路层 (FC-2),需要根据 PON 型拓扑结构做适当的收发控制调整。

(2) 对于网络终端-网络终端 (NT-NT) 模式 (第三方模式),在 PON 型拓扑结构下需要网络控制器进行数据中转才能进行通信。当网络控制器命令帧中的监控位 (monitor bit) 被置位时,表示在网络终端之间的信息交换传输中是需要网络控制器进行数据监控和存储的,而在该 PON 型拓扑结构下,由于网络控制器的中转使其并不需要网络终端在接收到数据后再向网络控制器回传数据帧,而是网络控制器在中转的过程中就进行数据监控和保存,如图 5 所示。在 NT-NT 突发模式中,当 monitor bit = 1 时,网

络控制器在转发过程中直接存储该数据序列,从而避免了在标准拓扑结构中发送网络终端回传数据序列所导致的额外功耗。

(3) 对于 NC-NTs (NC 广播或组播)、NT-NTs (NT 广播或组播)、无数据字模式命令(NTs)和有数据字模式命令(NTs)这 4 种多播传输模式,即网络控制器(或网络终端)到多个网络终端通信,由于无源光分路器一对多的通信链路传输特点,在实现多播任务时具有物理信道直接支持的优势,在标准 FC-AE-1553 协议中是通过“别名服务器”来实现的^[4],继而增加了额外的功耗损失,在 PON 拓扑结构下通过维持动态组播表的方案,既简化了网络系统结构,又降低了系统功耗。

链路组播服务协议的组播组建立方法如图 6 所示,首先网络终端节点的源 N 端口向网络控制器发出一个组播服务请求帧(CT_IU),在该帧中包含了需要进行组播地址,网络控制器组播服务器通过识别该帧中的组播地址首先与节点已存在的组播表进行核对,如果存在则向源网络终端节点返回组播建立成功链路帧(LS_ACC),然后便可以开始组播写入组序号的 FC-AE-1553 命令帧或数据帧,否则应该提取出目的节点地址添加到该网络控制器节点的组播表中,并将网络控制器节点为其分配的组播组序号写入到请求帧的 reserved 字段中,然后将其下行转发该请求帧(CT_IU)到各个网络终端节点中,网络终端节点获得该帧后提取组播组地址更新本机的组播表从而使网络终端节点的组播表与网络控制器节点的组播表保持一致。

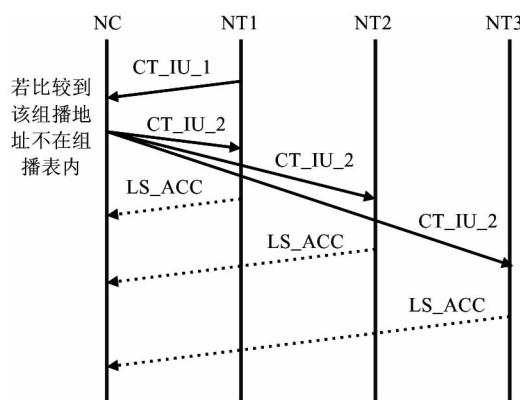


图 6 链路组播组建立方法图

当链路组播服务协议完成之后,网络终端节点接收到从网络控制器节点发来的组播帧,在确认为组播帧后立即查找自己的组播表,如果解析到该组播命令帧的组播组标志存在于网络终端节点的组播表中,则接收该帧数据,并递交给节点协议上层处理,否则直接丢弃。

3 PON 型拓扑功耗分析

3.1 功耗与网络时延

如图 7 所示,在面向链路层的节能方案设计中,不同的运行或节能模式下,能耗对比十分明显,而基于这种休眠模式的节能方案,其代价就是系统时延的增大。

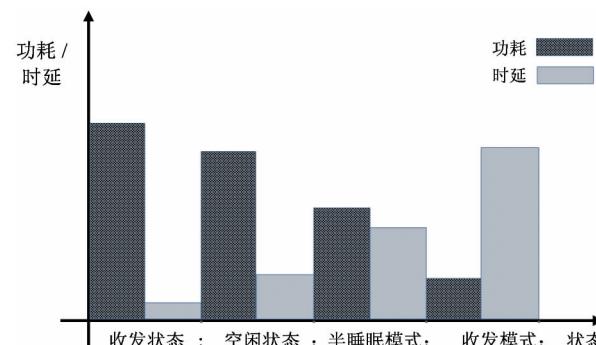


图 7 链路状态与功耗/时延的关系

基于睡眠的节能设计,势必需要考虑光接收器开启和关闭等开销所造成的影响。然而睡眠模式对于突发性质的业务流数据消息很有效,因为可以减少空闲时期的能量消耗,当链路上有数据在传输时,睡眠控制功能将不能起到节能的作用。这种节能设计应用在航天器电子系统网络中将特别有效,尤其是当航天器运行到地球的阴影面后,一些航天探测器此时并没有工作的需要,若使其运行于睡眠状态下,能有效地节省航天器中的电池能源消耗。

3.2 功耗与控制算法

FC-AE-1553 协议是一种基于命令响应的问答式协议^[4],任意的网络终端需要传输信息,都需要网络控制器向该网络终端发送一个接收/发送指令,网络终端将在给定的响应时间范围内发回一个状态

帧,并执行消息的接收/发送。网络终端的运行由网络控制器来控制,所以网络控制器的网络控制算法也极大地影响着节点的功耗。

网络终端有周期性消息和非周期性消息两种类型的消息任务^[26,27],然而在不同环境下,不同网络终端对消息任务实时性的需求也不一样,命令时序表的设计不但影响网络系统消息的时延,同时也影响着节能措施所能达到的效果,所以该节能方案的节能效果与命令时序表的设计有很大的关系。

3.3 功耗与光收发器

本文所研究的对象是基于 FC-AE-1553 协议的无源光网络(PON)型拓扑结构,相比于协议标准中交换式拓扑的光纤通道交换机高功耗的特点,无源光分路器的功耗则为零,所以该拓扑本身就是一种低功耗拓扑结构。为简化系统功耗模型,网络节点的能耗主要由光收发器模块、系统控制芯片、存储及配置接口电路等方面构成,并通过实际开发板的各模块功耗测试来计算节能模式下的 PON 型拓扑功耗。

该硬件测试平台如图 8 所示,为忽略无源光分路器对整个网络的功耗影响,仅仅测试该节能方案的使用对节点功耗的影响。在试验设计中使用两块开发板(一台为网络控制器,另一台为网络终端)进行回环连接,并依次执行命令序列表任务。该测试系统的控制芯片为 Xilinx 的 XC5VFX70T。正常工作时,每块测试板有 2 路电压供电,其中一路是给芯片的 PAD 供电,供电电压 3.3V,另外一路给芯片的内核逻辑供电,供电电压 1.5V。通过对网络控制器

测试板的 30 次命令消息任务执行之后,得到网络终端测试板各功能模块的平均功率消耗表,如表 1 所示。

表 1 不同模式下各模块功率消耗比较

	光收发器	控制芯片	附加模块	总功耗
正常模式	3.5W	2W	0.8W	6.3W
节能模式	0.302W	0.403W	0.6W	1.305W

从表 1 中可以得出,在节能模式下其总功耗可以下降 79%。另外从该表中可以看出节点的功率消耗主要是光收发器产生的,大约能占到正常收发模式下节点功率消耗的 1/2,所以能有效降低光收发模块所产生的功率消耗,将极大地改善网络的能量消耗情况。本研究对链路层设计了基于睡眠的节能措施,该措施的关键点就是有条件地开启和关闭光收发器,在光分路器的最大分光比下,可以预测:随着节点数的增加,该节能方案在 PON 型拓扑中越能取得不错的性能。

4 结 论

随着航空电子系统总线技术的发展,系统更加复杂,功能也越来越多,综合化、精确化、智能化、模块化的发展趋势日益明显,使得对航空航天网络电子系统的功耗提出了更高的要求。本文研究了 FC-AE-1553 协议无源光网络(PON)型拓扑结构节能设计,在继承其低功耗的基础之上,根据网络节点实现方案和协议特点,进一步提出了面向网络分层的三层节能设计方案,分别在物理层和交换层设计了相应的节能措施,并在链路层提出了两种基于睡眠的节能机制。最后通过对网络时延、网络控制算法和光收发器的影响来分析该低功耗措施的实际效果,得出了该节能方案能有效降低 FC-AE-1553 航电总线协议的组网网络功耗,更适合于未来航空电子系统对于机载数据总线的需求的结论。

参考文献

- [1] 韩双利,赵尚,宏底翔. 新型战机综合航电系统及其高速光互连技术. 光通信, 2008, 45(3):50-55



图 8 硬件测试平台实物图

- [2] Thomas D G. Cots fiber channel network technology insertion into avionics systems. In: Proceedings of the IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference, Dayton, USA, 1998. 120-127
- [3] NCITS. TR-NCITS. xxx-200x Fibre channel avionics environment (FC-AE), USA: Information Technology Industry Council, 2002
- [4] NCITS. TR-NCITS. xxx-200xFibre Channel - Avionics Environment - Upper Layer Protocol MIL-STD-1553B Notice 2 (FC-AE-1553), USA: Information Technology Industry Council, 2006
- [5] Wang C Y. Simulation and analysis of FC network. In: Proceedings of the 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN), Bonn, Germany, 2003. 285-288
- [6] Zhang J Y, Saeid H, Masood K, et al. A novel power harvesting scheme for sensor networks in advanced avionic applications. In: Proceedings of the 20th International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), Abu Dhabi, UAE, 2013. 921-924
- [7] Chennu S, Habel K, Langer K D. Protected Ethernet Rings for Optical Access Networks. In: Proceedings of the 2006 ITG Symposium on Photonic Networks, Leipzig, Germany, 2006. 29-36
- [8] Hoang S V, Trung H B. Integrated bidirectional ring design with splittable traffic routing. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Technologies for Communications, Hanoi, Vietnam, 2008. 384-387
- [9] 曹素芝, 张善从. 基于无源光网络的高速光纤总线技术研究. 宇航学报, 2011, 32(5):1156-1162
- [10] 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. 光通信, 2014, 35(5):858-861
- [11] 周桃, 宗竹林, 赵磊. 一种 PON 结构航电总线协议的建模与仿真. 计算机工程与应用, 2011, 47(29):60-63
- [12] 周鹏飞, 宗竹林, 肖龙. 一种 PON 结构航空总线协议芯片的内存架构. 微电子学与计算机, 2013, 30(9):5-8
- [13] 肖龙, 宗竹林, 周鹏飞等. PON 结构航空总线协议芯片仿真验证方法. 微电子学与计算机, 2014, 31(2):62-71
- [14] Adrian Butter. FC-EE Parameter Negotiation Proposal, T11 Document 14-107v0. Saint; IBM Systems and Technology Group, 2014
- [15] Schrenk B, Bonada B F, Bauwelinck J, et al. Energy-efficient optical access networks supported by a noise-powered extender box. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(2):480-488
- [16] 肖巧生, 寿国础, 胡怡红等. 无源光网络睡眠节能方式研究. 光通信研究, 2012, 01:12-15
- [17] Wong S W, Valcarenghi L, Yen S H, et al. Sleep mode for energy saving PONs: Advantages and drawbacks. In: 2009 IEEE Globecom Workshops, Honolulu, United States, 2009. 1-6
- [18] Chow H K, Suvakov D, Veen D V, et al. Demonstration of low-power bit-interleaving TDM PON. In: Proceedings of the 38th European Conference on Optical Communication, Amsterdam, Netherlands, 2012. p. Mo. 2. B. 1
- [19] 谭淑芳. 光网络的节能技术研究:[硕士学位论文]. 成都:电子科技大学, 2012
- [20] 杨立. 基于 PON 结构的 FC _ AE _ 1553 协议芯片的关键模块研究与实现:[硕士学位论文]. 成都:电子科技大学, 2013
- [21] NCITS. dpANS X3. 288-199xFibre Channel-Generic Services (FC-GS), USA: Computer & Business Equipment Manufacturers Association, 1996
- [22] 赵继军, 冯楠, 任丹萍. 下一代无源光网络节能关键技术. 中兴通讯技术, 2014, 20(5):23-28
- [23] 季海铭, 徐鹏飞, 谷永先等. 新一代高速光通信网络用低成本、低功耗、高性能 GaAs 基 1.3 微米量子点激光器的研究. 见:中国光学学会 2010 年光学大会论文集. 中国光学学会. 2010. 3
- [24] Mohit A. 硬件架构的艺术-数字电路的设计方法与技术. 北京:机械工业出版社, 2014. 20-38
- [25] 赵磊. 基于 PON 结构的命令响应传输协议研究:[硕士学位论文]. 成都:电子科技大学, 2011. 16-20
- [26] 顾明剑, 殷德奎. 1553B 总线控制方法研究. 红外, 2004, 10(12):21-27
- [27] 刘桂山, 胡军程. 1553B 总线信息流设计. 北京理工大学学报, 2003, 23(3):301-304

Layered energy-efficient design of PON type FC-AE-1553 networks

Che Ming, Zhou Dong

(Research Institute of Electronic Science and Technology , University of
Electronic Science and Technology , Chengdu 611731)

Abstract

To meet the low power-consumption requirements of avionics bus networks working in fiber channel (FC) -avionics environments (AE), a model for layered design of energy-efficient FC-AE-1553 networks of the type of passive optical network (PON) was proposed, and a three-layer (exchange layer, link layer and physical layer) scheme for net node design was given. The scheme takes the advantage of the low energy-consumption characteristic of the PON topology, designs rational energy-saving measures according to the topological structure and the FC-AE-1553 protocol. Meanwhile, it designs two kinds of energy-saving mechanism, half sleep and deep sleep. The scheme's real performance and its influence factors were studied by theoretical analysis and experiment, and the experimental results show that the power consumption of the network terminal (NT) can be reduced by 79% when using this scheme. The study provides an effective way for building energy-efficient avionics networks.

Key words: energy-efficient, FC-AE-1553, passive optical network (PON), fibre channel, sleep, optical receiver/transmitter module, time-delay