

面向空间应用的大容量实时网络总线架构

唐金锋 郑 堃 哈云雪 和攀峰

(西安微电子技术研究所, 西安, 710054)

摘要:针对未来空间综合电子系统总线网络发展需求, 本文在介绍现有星载电子系统体系架构优缺点的基础上, 提出了一种面向空间环境应用的高速高可靠实时网络总线架构。对网络协议架构、网络拓扑、工作原理及网络关键设备进行了详细介绍, 该技术 10 Gb/s 的传输带宽、亚微秒时钟同步精度、多通道冗余传输机制能够满足未来空间环境应用需求, 为未来空间电子系统网络架构研究提供借鉴。

关键词:以太网; 时钟同步; 实时通信; 网络架构

中图分类号: TP336

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2018)S1-0023-05

Architecture of Large Capacity Real-Time Network for Space Application

TANG Jinfeng, ZHENG Kun, HA Yunxue, HE Panfeng

(Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an, 710054, China)

Abstract: Based on the developing requirement of the integrated space electronic system network in future, this paper introduces the existing framework of spaceborne electronic system. On the basis of its advantages and disadvantages, a high-speed and high reliability real-time network architecture is proposed. The protocol architecture, network topology, working principle, and network terminal key equipment are introduced. Moreover, the characteristics of 10 Gb/s transmission bandwidth, sub-microsecond clock synchronization precision and multi-channel redundant transmission mechanism can meet the application needs of future space environment. The study of large capacity real-time network provides a promising solution for the future integrated space electronic system network.

Key words: ethernet; clock synchronization; real-time communication; network architecture

目前星载电子系统多由不同子系统构成, 在管理和控制上各个子系统独立构成闭环, 各子系统独立设备由星载计算机通过串行总线互连。这种体系架构的优点是设备连接简单, 便于子系统独立设计调试, 但弊端也很突出, 即所有节点均需计算机控制且各子系统独立封闭, 造成硬件资源重复配置以及软件的重复开发^[1]。

随着国内空间技术的快速发展, 星上电子系统中电子设备不断增多, 采集状态信息数据量日益增大, 数据处理实时性要求不断提高, 对于体积和重量的要求日趋严苛, 原有体系结构已不再

适用^[2], 为进一步提升系统性能, 降低设备体积、重量成本, 可采用高性能信息计算平台为中心, 高速一体化网络将所有设备互连, 通过大数据交互, 实现各系统数据处理资源共享^[3], 统一进行调度管理, 这对于互连总线的带宽、实时性及可靠性提出了更高的要求, 为满足未来星上系统的发展需要, 将万兆以太网技术与时间触发通信技术相结合, 设计一种面向空间应用的光互连万兆实时网络技术, 满足实时性、确定性、可靠性数据互连的需求和未来高清图像及视频等超大数据量的传输需求。

收稿日期: 2018-03-23; **修订日期:** 2018-05-30

通信作者: 唐金锋, 男, 工程师, E-mail: jinfengtang@126.com。

引用格式: 唐金锋, 郑 堃, 哈云雪, 等. 面向空间应用的大容量实时网络总线架构[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(S1): 23-27. TANG Jinfeng, ZHENG Kun, HA Yunxue, et al. Architecture of large capacity real-time network for space application[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S1): 23-27.

1 网络协议架构

光互连万兆实时网络是在 IEEE802.3 标准交换式以太网^[4]的基础上,对数据链路层和网络层进行改造实现的确定性网络通信技术。根据安全关键性电子系统通信的特点以及空间环境工作需求,引入网络时钟同步、虚拟链路^[5]、时间触发通信^[6-7]和冗余传输等技术来实现确定性通信和可靠性通信。数据传输率可达 10 Gb/s,网络时钟同步精度达亚微秒级,采用光纤链路实现物理层信号的传输。有利于小型化设备尺寸和缩减互连线缆重量,同时大大提高网络传输带宽和网络可靠性。光互连万兆实时网络协议架构如图 1 所示。

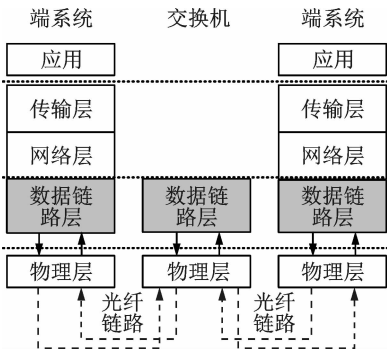


图 1 网络协议架构
Fig. 1 Network protocol architecture

网络中的有效数据传输采用用户数据报协议 (User datagram protocol, UDP),传输层与网络层通过标准网络协议栈和实时网络协议栈为两种类型的数据传输提供支持,数据链路层经过适应性改造,使其能够支持网络时钟同步、虚链路实时通信机制和冗余通道数据传输,物理层遵循标准的 10GBASE-R 设计规范,采用 64B66B 编码,物理传输介质为光纤线缆。

2 网络拓扑

为实现网络的故障容错以及高可靠性,光互连万兆实时网络的网络互连结构采用分布式交换网络拓扑,并支持数据链路冗余的通信方式,典型的双冗余互连网络拓扑如图 2 所示。

在实际工程应用中,该网络作为空间设备的骨干网,通过交换机实现主干网上核心设备节点互连,使用网关将所有中速子网、低速子网和其他从属设备接入到骨干网中,图 3 为一个典型的网络应用组建示例。

如图 3 所示,核心交换机实现高速骨干网的数据交换,是网络各个功能节点通信中枢,为整

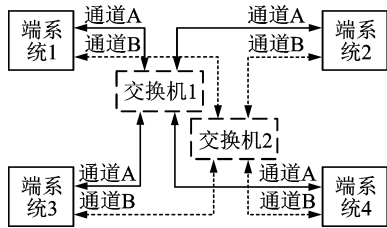


图 2 双冗余互连网络拓扑
Fig. 2 Double channel redundant network topology

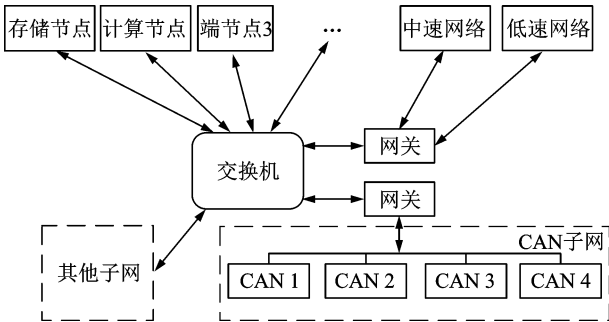


图 3 典型网络应用示例
Fig. 3 Example of typical network application

个网络提供数据信息和控制信息的高速交换;网络的主要核心节点为存储节点模块、计算节点模块等主干网节点,作为网络中的核心关键设备可实现对整个网络数据的管理和控制,例如存储节点模块为整个网络提供大数据量高速存储功能;高性能核心计算模块,为全网络提供快速运算处理能力;其他子网,如无线通信激光通信设备能够扩展网络的通信及数据传输能力;中速网络和低速网络(例如控制器局域网(Controller area network, CAN)总线或 1553 总线等)通过网关或交换机与骨干网相连,骨干网中核心关键设备可使用双冗余网络连接的方式进行互连,来保证核心关键设备的可靠性。

3 网络工作原理

3.1 网络数据包格式

光互连万兆实时网络在支持高速实时数据通信的同时,兼容通用标准网络通信,标准网络数据帧格式和实时网络数据帧格式分别如图 4 和图 5 所示。

从图 4 中可以看出,标准网络数据帧格式完全兼容 IEEE802.3 协议规范,在数据传输时采用的上层协议栈为 UDP 协议,帧类型为 0x0800。当网络配置为可以传输标准网络数据时,网络中可以直接接入标准网络数据节点,不需要对标准网络设备做任何修改。

图 5 中的实时网络数据帧格式符合 IEEE802.3 标准规范,帧类型为 0x88d7^[7],目标

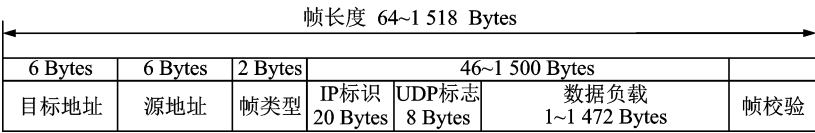


图 4 标准网络数据帧格式

Fig. 4 Standard network data frame format

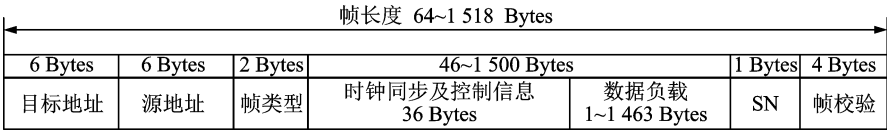


图 5 实时网络数据帧格式

Fig. 5 Real-time network data frame format

地址的最高字节低两位为 0x3,最低两个字节表示虚链路号。相比标准网络数据帧格式添加了用于增强数据传输完整性、可靠性的顺序号 (Sequence number, SN) 字段和用于网络时钟同步的时钟同步和控制信息字段,实时网络数据帧在网络中路由采用虚链路的方式进行。

3.2 网络时钟同步

网络时钟同步是光互连万兆实时网络中各节点设备的实时数据通信的基础,网络的时钟同步与实时数据通信是协同工作的。

网络时钟同步的基本工作原理是由同步主节点向网络发送实时通信数据包,数据包中携带节点当前的同步时钟值 T_{tx} ,当网络中的数据包被发送或转发时会携带包含网络传输延迟的透明时钟 $T_p^{[7]}$,同步从节点在接收到实时通信数据包时会记录接收时间 T_{rx} 。通过式(1)即可计算出同步从节点向同步主节点同步时需要修正的时间值 ΔT

$$\Delta T = T_{rx} - (T_{tx} + T_p) \tag{1}$$

当节点工作在多通道模式下时,时间修正值取多个通道的平均值。

网络中同步主节点可设置多个并且设置为不同的优先级,所有节点均按照接收到的最高优先级同步主节点的时间信息进行同步,当一定时间内接收不到对齐的同步主节点的时钟信息时则自动向其他同步主节点中的最高优先级的节点同步。

3.3 数据通信

基于虚链路^[6]的通信方式是保证数据确定传输的有效方式之一,虚链路(Virtual link, VL)的概念为:在单个的物理通讯链路上通过时分复用原理建立的用于系统或者是应用互连的多个逻辑通讯链接。网络中的实时数据通信是在虚拟链路的基础上实现的,在网络中一条虚拟链路由唯一的虚拟链路标识 (identification, ID),其属性有通信周期 (Period),时间偏移 (Offset),最大帧长度 (Max-Length),图 6 显示了虚链路在物理通道中的示

意图。



图 6 物理通道中的虚拟链路

Fig. 6 Virtual links in physical channel

由图 6 所示,物理通道中可以划分多条虚链路,其中虚链路的路由关系由虚链路 ID 唯一指定,虚链路占用的网络带宽可通过通信周期和最大帧长度的乘积进行计算,每条虚链路在网络中的每条物理通道上通信时间窗口可以通过通信周期和时间偏移来确定。结合上层应用对数据通信的要求,在整个网络处于时钟同步的前提下,所有的实时通信都在事先规划好的虚拟链路中进行,从而整个网络中的关键数据传输不会出现冲突或发生阻塞,使得数据传输的实时性和可靠性得到有效保证。

图 7 中使用一个交换机将 3 个端节点相连,节点 1 上规划了两条虚链路发送到节点 3,两条虚链路的通信周期分别为 2 ms 和 3 ms;节点 2 规划有一条虚链路发送至节点 3,通信周期为 2 ms。网络上各虚链路的数据发送时序如图 7 所示。

3.4 网络可靠性

网络可靠性是指在一个具有特定意义的环境下和规定的时间内,网络能够完成规定通信业务的能力。星载电子系统中对于网络的可靠性^[8]要求很高,骨干网的可靠性尤为关键。大容量实时网络总线的可靠性从网络拓扑^[9]、时间同步、数据通信、物理层信号传输等方面来保证网络可靠性。

(1)网络拓扑,该网络采用分布式交换网络架构,所有功能节点在网络中均相互独立,一旦有某

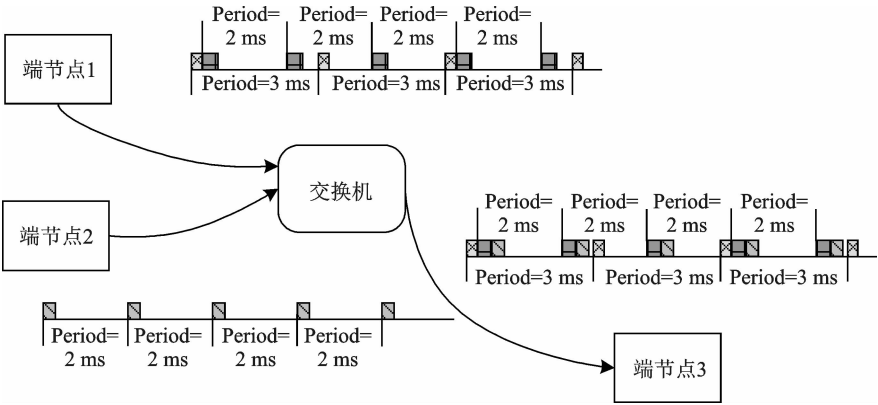


图 7 网络上各虚链路的数据发送时序
Fig. 7 Frame transmit timing of VLs in network

些节点发送故障或失效,不会影响整个网络的功能。

(2)时钟同步,为主从式时钟同步方式,主节点可以设置为多个,可避免网络时钟同步过程中因节点故障导致同步失败。

(3)数据通信,在数据链路层实现的多通道冗余传输机制、时间触发通信机制^[10]及虚链路通信保证数据通信的可靠性和数据完整性。

(4)物理层支持光纤^[11]介质互连,光纤链路没有电磁泄露同时也不受外界电磁辐射和电磁脉冲的干扰,可有效提高设备的可靠性和稳定性。

4 网络关键设备

4.1 端系统

端系统作为网络的接入终端,实现时钟同步协议的同时,完成数据协议组包、时间触发机制下的数据发送、数据协议解包、数据冗余接收及协议完整性检查等工作,保证骨干网有效数据的可靠收发。

端节点控制器具备分布式时钟同步、基于时间触发通信的数据发送调度、冗余发送控制、完整性检查以及接收冗余管理等功能。

4.2 交换机

交换机能够实现所有的端系统之间的连接,参与实现网络时钟同步,并为网络提供可靠实时的数据交换,在时分多址(Time division multiple address, TDMA)机制下实现数据接收和转发,以及网络工作状态的收集及管理。

4.3 网关

网关^[12]用于实现分支子网和其他协议类型的网络到骨干网的接入。对于大型混合网络来说,网关是必不可少 的关键设备。从图 3 给出的典型网络拓扑示例中可以看出网关具备同一种数据协议下的速率转换或不同协议类型的数据的协议转换

功能。

5 结束语

本文针对现有星载电子系统体系架构的不足,结合未来空间电子系统网络总线发展需求,在 IEEE802.3 标准以太网技术的基础上,提出了一种面向空间环境应用的大容量实时网络总线架构,并从网络协议架构、网络拓扑、工作原理及网络关键设备进行了阐述。该总线架构可以保证未来星上控制、数据等大数据量信息在星载网络中实时、可靠地传输和交换,可有效提高星载互连网络技术能力。

参考文献:

[1] 王九龙. 卫星综合电子系统现状和发展建议[J]. 航天器工程, 2007, 16(5): 68-73.
WANG Jiulong. Development state and thought of the satellite synthesized electronic system[J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(5): 68-73.
[2] 郝燕艳, 潘瑞, 万小磊. 基于 TTEthernet 的综合电子系统通信网络研究[J]. 航天器工程, 2013, 22(6): 89-91.
HAO Yanyan, PAN Rui, WAN Xiaolei. Research of integrated avionics communication network based on ttethernet[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(6): 89-91.
[3] 李孝同, 施思寒. 小卫星星务管理技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014.
[4] IEEE 802.3. IEEE Std 802.3ae—2012: Media access control (MAC) parameters, physical layers, and management parameters for 10 Gb/s pperation[S]. USA: IEEE, 2012: 37-38.
[5] ARINC. ARINC specification 667P7-1: Aircraft data network, part 7, avionics full duplex switched ethernet(AFDX) network[S]. Maryland: AEEC, 2009: 10.

[6] OBERMAISSER R. Time-triggered communication [M]. Florida, US:CRC Press, 2012.

[7] SAE. AS6802: Tim-triggered ethernet [S]. USA: SAE International, 2011-11:106.

[8] 熊蔚明,刘有恒. 关于通信网可靠性的研究进展[J]. 通信学报, 1990, 11(4):43-49.
XIONG Weiming,LIU Youheng. On the reliability of communication networks—A review[J]. Journal of China Institute of Communications,1990, 11(4):43-49.

[9] 周庆瑞,孙辉先. IEEE1394 网络拓扑结构的可靠性研究[J]. 宇航学报,2008,29(4):1408-1413.
ZHOU Qingrui,SUI Huixian. On reliability of physical topology for IEEE1394[J]. Journal of Astronautics,2008, 29(4):1408-1413.

[10] 邱爱华,张涛,顾逸东. 面向空间应用的时间触发以太网[J]. 国防科技大学学报,2014,36(5):117-123.
QIU Aihua, ZHANG Tao, GU Yidong. Time-triggered ethernet for space utilization[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(5):117-123.

[11] 邱琪,宋玉娥,阳树宗. 空间站信息系统与光纤通信技术[J]. 电子科技大学学报,2000,29(4):365-368.
QIU Qi, SONG Yue, YANG Shuzong. Fiber optic communication and informa-tion system in space stations[J]. Journal of UEST of China,2000, 29(4): 365-368.

[12] 万志江,吴静. 基于双 CAN 总线的透明式网关设计[J]. 航天控制,2010,28(3):42-46.
WAN Zhijiang, WU Jing. Design of transparent gateway base on double CAN network [J]. Aerospace Control, 2010, 28(3):42-46.

(编辑:夏道家)