

面向下一代航电系统的数据块填装性能

黄 晖¹ 何 浩¹ 金耀辉¹ 黄浩益² 吴建民²

(¹ 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)
² 航空电子系统综合技术国防科技重点实验室, 上海 200233)

摘要 结合光分组交换(OPS)网络和光纤通道(FC)技术的优势,提出一种下一代航电系统组网方案——基于光分组交换网络的光纤通道技术(FC over OPS)。建立了数学仿真模型,研究了一种数据块填装算法与网络实时性之间的关系,分析不同的参数如发送带宽、最低效率门限、发送定时的选取对网络实时性的影响。进一步完成硬件原型设计和仿真,比较了软件仿真与硬件仿真的结果,并分析该数据块填装算法的性能。

关键词 航电系统; 光分组交换网络; 光纤通道; 数据块填装

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200828s2.0253

Data Segments Aggregation Performance in Next Generation Avionics Systems

Huang Hui¹ He Hao¹ Jin Yaohui¹ Huang Haoyi² Wu Jianmin²

(¹ State Key Laboratory on Advanced Communication Systems and Networks, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China
² National Defense Science and Technology Key Laboratory for Avionics System Integration Technology, Shanghai 200233, China)

Abstract We integrate the advantages of optical packet switching (OPS) network and fibre channel (FC) technology, and put forward fibre channel transportation based on optical packet switching network (FC over OPS) as a solution for next generation avionics systems internetworking. We focus our research work on the interrelation between data segments aggregation and network real-timing performance. By simulation, we analyze the impact that bandwidth, minimum efficiency threshold and timing contribute to the network real-timing. Furthermore, we complete hardware prototype design and simulation, compare the results between software and hardware simulation and analyze the performance of this algorithm.

Key words avionics systems; optical packet switching network; fibre channel; data segments aggregation

1 引 言

在现代航电系统中对连接机身上各个传感器的机载总线技术提出了许多要求^[1],如数据带宽、负载、吞吐量、网络延时和抖动等指标。随着航电系统的不断发展,其集成度也日益提高,机身上传感器数量越来越多,对于大带宽数据传输的要求更加迫切。同时,互连各个传感器的电缆数量也大幅增加,信号传输质量和电磁兼容性问题相比以往更为突出。因此,传统的基于电交换的总线技术不能够适应未来

机载核心网络的性能要求,而采用光网络互连替代原有的电总线技术很有可能在不久的将来应用在下一代航电系统中。光分组交换(OPS)网络作为理想的下一代光网络技术,具有交换容量大、传输带宽大、网络延时小的优点^[2~4]。另一方面,光纤通道(FC)协议作为现有的机载总线协议,其性能已经得到广泛的认可^[5~10]。由于这两者本身的优势,所以提出一种融合的方案——基于光分组交换网络的光纤通道技术(FCoverOPS),作为面向下一代航电

基金项目: 国家自然科学基金(60632010)资助课题。

作者简介: 黄 晖(1984—),男,硕士研究生,主要从事 FPGA 实现网络互连方面的研究。

E-mail: huanghui_123@sjtu.edu.cn

导师简介: 金耀辉(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事光网络控制和交换等方面的研究。

E-mail:jinyh@sjtu.edu.cn

系统的可选组网方案。

在该方案背景下,传感器发送的数据块一般远小于光纤通道数据帧的净荷区长,由于光分组交换网络中核心节点的光交换资源非常宝贵,且核心网络中的交换粒度相对上层协议较大。若上层协议采用一对一的映射方式,将对下面两层的资源造成不小的浪费,影响整体性能。因此需在上层协议映射到光纤通道时采用多个数据块填充的方式,以提高光纤通道数据帧净荷区利用率,进而有效利用光分组交换核心网络中的资源。

2 光分组交换网络简介

光分组交换技术以光分组的形式来承载业务数据,是传统的分组交换技术向光层的渗透和延伸。光分组主要由分组头和数据净荷两部分组成。数据净荷的交换和传输一般在光域中进行,而分组头的控制和处理技术当前在电域内比较成熟^[3]。

2.1 网络拓扑结构

图 1 是光分组交换网络的一般结构。光分组交换网络(OPSN)是由核心节点和边缘节点两种类型的节点组成。核心节点主要负责数据在光域内高速转发和交换。边缘节点用于连接各种接入网如 10 G以太网等,主要负责数据分组在电域内的解析、封装、汇聚和路由。

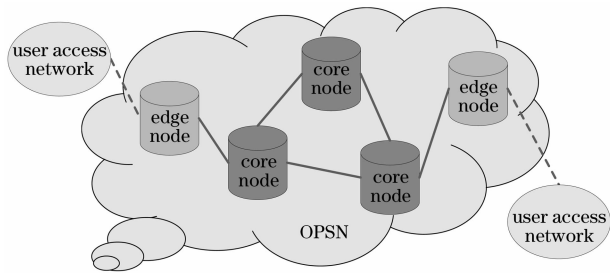


图 1 光分组交换网络拓扑结构
Fig. 1 OPS network topology

2.2 核心节点

光分组交换网络核心节点的结构如图 2 所示。核心节点主要由复用器和解复用器、输入接口、带有光缓存和波长变换器的交换单元、输出接口以及交换控制单元组成。光分组经过核心节点时,首先位于输入端链路中的光分组被解复用成多个独立的波长通道,并传递给输入端口。每个光分组由数据净荷和包含路由信息的分组头组成。输入端口负责抽取光分组头并把它传递到交换控制单元进行处理。交换控制单元根据这些分组头中的信息指定光分组发送的输出端口和波长,并且指示交换单元为光分组选路。在为这些分组进行选路的过程中,交换单元可将光分组进行缓存或把它变换到一个新的波长上。交换控制单元同时还能给光分组指定一个新的分组头,并将这个新分组头传递到输出端口。当光分组到达输出端口时,新的分组头将代替原有的分组头。之后,带有新分组头的光分组就通过输出端口链路沿着已经确定的路径传送到网络中的下一个节点。

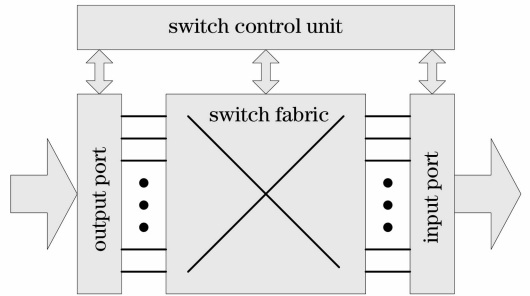


图 2 光分组交换网络核心节点
Fig. 2 Core node in OPS network

2.3 边缘节点

光分组交换网络边缘节点的一般结构如图 3 所示。在发送数据流方向,数据包进入边缘节点后首先对其按照一定的规则如地址和端口进行分类。经过分类后,相同的数据包将进行汇聚形成光分组的

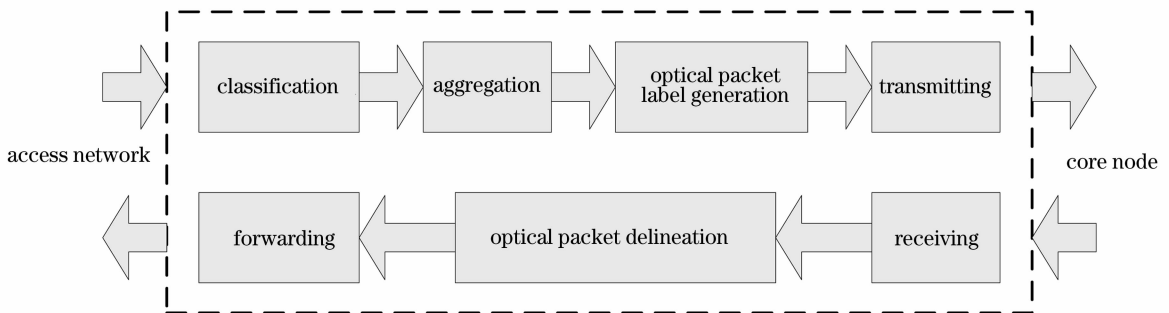


图 3 光分组交换网络边缘节点
Fig. 3 Edge node in OPS network

净荷数据,同时对每一个光分组将会生成一个代表决定该分组在网络中路由的标记。标记内主要包含源地址、目的地址、源端口、目的端口、分组长度以及校验和等信息。标记与该分组在核心网络中得到的服务质量等级有关。在光分组突发发送之前,边缘节点还会按照一定的优先级排列不同分组的发送次序。在接收数据流方向,光分组经突发接收后,边缘节点将拆分光分组净荷数据还原成若干独立的数据包。之后,根据查表所得的信息,将每个数据包送到不同的端口并转发出去。

3 光纤通道技术简介

FC 技术可实现大容量、高速度的数据传输,现已成为一种高速传输数据、音频和视频信号的串行通信标准。光纤通道的传输速率目前支持 4 Gb/s 和 8 Gb/s,未来可达 10 Gb/s 以上的水平^[4]。

3.1 拓扑结构

光纤通道定义了 3 种基本的网络拓扑结构:点对点、仲裁环和交换型结构。点对点方式独享链路带宽,适用于传输大容量实时数据的情况。仲裁环属于带宽共享型拓扑结构,适合带宽要求低,通信节点少的情况。交换型结构组网灵活、功能性强、构成最复杂,适用于通信节点多且带宽要求较高的情况。

3.2 协议分层

光纤通道协议模型分为 5 层,FC-0 层描述物理介质,规定了收发信号的传输介质、传输方式和速率;FC-1 层是传输协议,规定了编解码和时钟同步机制;FC-2 层定义了帧协议和流量控制方式;FC-3 层负责同一节点多个端口的传输类型,即公共服务;FC-4 层承载上层映射协议。

3.3 服务类别

光纤通道定义了 6 种服务方式,能有效兼容现有网络通信中所有的服务级别,满足不同情况下的数据传输要求。第 1 类服务为独享专用链路;第 2 类服务为多路复用链路;第 3 类服务为数据报链路;第 4 类服务为多路带宽链路;第 5 类服务用于同步、即时服务,目前还没有完整定义;第 6 类服务为多点传送链路。这 6 种服务方式的不同之处主要在于流量控制的类型之间有所差异,可根据传输数据的类型和通信的要求选择合适的服务方式。

3.4 数据帧结构

光纤通道数据帧结构包括 4 bit 的帧开始、24 bit 的帧头、2112 bit 的数据区、4 bit 的 CRC 检错和 4 bit 的帧结束,其中数据区由 64 bit 的可选帧头和

2048 bit 的净荷数据组成。

光纤通道中的最小信息单元为传输字符,由若干传输字符组成传输字,传输字组成不同的数据区段,各种数据区段组成数据帧。一般来说,光纤通道接口之间传输由一系列数据帧构成的数据序列,上层的各种协议就是通过映射到光纤通道数据帧的各个数据区段,形成了由多个数据帧组成的不同长度的数据序列。

4 数据块填装算法

4.1 仿真建模

首先建立一数据块接收模型,由于光纤通道数据帧净荷区的长度为 2048 bit,为便于仿真,将该模型的长度参数设为 2000。该模型具有定时器和门限判别功能,能接收外界发来的数据块并按照以下的填装步骤进行操作:

1) 设置一数据帧填装最低效率门限,保证最低净荷区利用率。每当新生成一数据帧,数据块填装数据帧时,装入的数据块总长必须达到这一门限后才有可能被发送。

2) 在 1) 的基础上,设置一数据帧发送定时器。每当新生成一数据帧时开始计时,当数据块总长达到最低效率门限后,若定时器到时则发送,否则继续填装数据块,等待发送。

3) 在任何情况下,若整个净荷区都填满,则无论定时器是否到时都发送数据帧。

之后,为该模型生成数据块发送序列。由于航电系统中传感器的种类多样,所发送的数据在类型和长度上各不相同,因此仿真中定义发送序列中的数据块分为三种不同的类型,长度分别为 20、60、100,并且这三类数据块之间的业务量之比为 6:3:1。最后仿真过程中测量在一定的发送带宽、最低效率门限和定时长度时,每次从生成一新净荷区到净荷区填装完毕并发送之间的延时和净荷区利用率随负载变化的情况。

光纤通道中两种常见的带宽模式为 4 Gb/s 和 8 Gb/s,平均延时在 10 μ s 左右,因此仿真过程中选取这两种发送带宽值,定义最低效率门限为 0.4 和 0.6,并设置定时长度为 10 μ s 和 6 μ s,构成 [4 Gb/s, 0.4, 10 μ s]、[4 Gb/s, 0.6, 6 μ s]、[8 Gb/s, 0.4, 6 μ s]、[8 Gb/s, 0.6, 10 μ s] 这四种仿真条件。

4.2 软件仿真流程

程序执行流程如下:首先定义发送带宽、负载、净荷区长度、最低效率门限、定时长度等基本参数,

并设置统计次数。负载取一定值后,不断生成数据块送入净荷区。当净荷区内数据块总长没有到达最低效率门限时,不断循环接收数据块并计算时间和长度。到达门限值后判断此时是否超时或装满,若没有则继续循环接收,否则发送并记录下此时的净荷区长度计算利用率,计时器中的时间即为延时。统计多次后,计算该负载下的平均延时和利用率。之后负载取下一值,循环之前的计算过程,直到全部完成,输出结果。

4.3 硬件设计原型

硬件设计原型为一可实现模块 DatSegMpr,能通过综合与布局布线最终下载到实际器件如 FPGA 中。该模块完成数据块封装功能。除了基本的时钟 (Clk) 和复位 (Rst) 信号外,它具有数据输入 (DataIn) 和数据输入指示 (DataVld) 用于接收外界向其发送的数据块序列。设计的核心为一个状态机,可以表示初始 (FSM_INIT)、忙碌 (FSM_BUSY)、空闲 (FSM_IDLE)、发送 (FSM_SEND) 四个状态,在这四种状态互相配合下,设计完成封装算法。此外,模块中还包含最低效率门限 (EFF_THH)、定时长度 (TMR_THH)、填满指示 (LEN_THH)、净荷区长度 (PLD_LEN) 四个参数,用于不同仿真条件下的设置。

4.4 硬件测试平台

硬件仿真与软件仿真相比,最大的区别在于软件仿真是基于模型的行为仿真,而硬件仿真则更接近底层实现,因此硬件仿真能更好地反映设计模块的具体工作机制,从而更好地验证算法的可行性。硬件仿真一般是通过编写测试平台与测试模块实现。

硬件仿真框图如图 4 所示。测试平台 TestBench 与测试模块 PktGen 用于硬件仿真,PktGen 负责生成数据块序列,测试平台 TestBench 作为顶层模块控制和协调 PktGen 和 DatSegMpr 的参数和信号,并负责

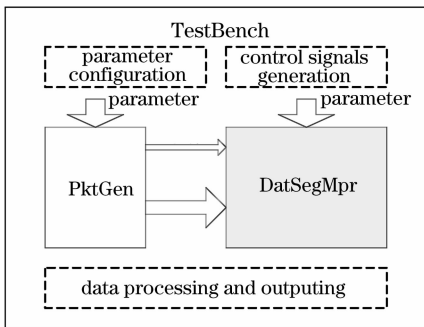


图 4 硬件仿真框图

Fig. 4 Hardware simulation block diagram

在仿真过程中数据的测量、计算和输出。

5 实验结果

5.1 软件仿真结果

软件仿真结果符合预期。图 5 表示的是平均延时随负载变化的情况,可见平均延时曲线可分为三段。第一段中平均延时随负载增大显著减小,数据块封装达到最低效率门限时已超过定时长度,表明在低负载时延时取决于发送带宽和最低效率门限;第二段中延时曲线平坦,接近定时长度取值,此时净荷区利用率都在一定程度上超过最低效率门限,延时由发送带宽和定时长度两者决定;第三段中,延时随负载增大缓慢下降,一般没有达到定时长度数据块就已填满净荷区,说明负载较大的情况下延时完全由发送带宽决定。

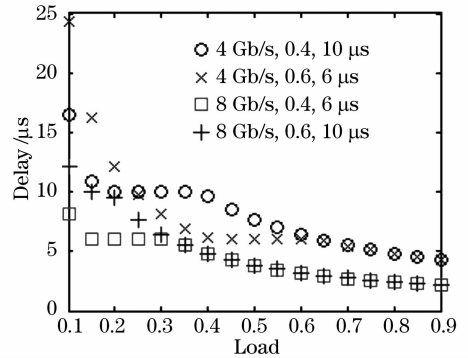


图 5 平均延时随负载变化情况

Fig. 5 Average delay versus load

图 6 表示的是净荷区平均利用率随负载变化的情况,可见平均利用率曲线也可分为三段,这和平均延时曲线有相似之处,可从另一个方面反映数据块封装净荷区时在不同负载下的特点。第一段中曲线的数值即为最低效率门限;第二段中曲线呈线性增长,带宽越大增长的斜率越大;第三段中净荷区封装

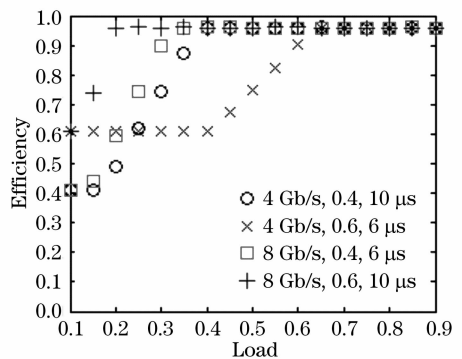


图 6 平均利用率随负载变化情况

Fig. 6 Average efficiency versus load

满,因此平均利用率几乎达到 1。

对仿真结果分析后可见,虽然当负载较小时一些仿真条件下的平均延时会比较大,但当负载较大时所有仿真条件下的延时都不会超过一定值,并随负载增大而减小。也就是只要最低效率门限值不超过 0.6,在负载大于 0.3 的情况下,若发送带宽取值为 4 Gb/s,则完全可保证平均延时不超过 10 μ s,若发送带宽取值为 8 Gb/s,则平均延时的情况更理想,能达 6 μ s 以下。因此,该数据块填装算法能提高航电系统组网方案下的网络实时性能。

仿真结果表明该算法具有以下几个优点:最低效率门限保证了光纤通道数据帧净荷区最低利用率,从而使光分组交换网络核心节点资源得到有效利用;若达到门限且还未超时仍可继续填装,提高利用率;定时器的设置可很好地解决发送带宽较低时填装整个净荷区造成延时过大的问题,从而提高网

络的整体性能。

5.2 硬件仿真结果

在硬件仿真中,测试平台中的 PktGen 发送数据块序列给 DatSegMpr,当数据块填装满足要求发送后,测试平台会立刻记录填装时间并同时生成控制信号重置 DatSegMpr,等待一段时间便开始下一次填装过程。

硬件仿真结果如表 1 所示,可见硬件仿真与软件仿真的结果非常接近,验证了仿真中已得出的结论,即最低效率门限取 0.6 以下并且负载 L 不低于 0.3 时,该数据块填装算法在带宽为 4 Gb/s 时能获得不超过 10 μ s 的延时,带宽等于 8 Gb/s 时延时可小于 6 μ s。硬件仿真同时也表明了算法具有一定的可行性。需要说明的是某些表项中数据相同是因为数据块生成时采用伪随机序列,当延时仅与发送带宽有关时所得到的测量值是相同的。

表 3 硬件仿真结果

Table 3 Hardware simulation result

	$L=0.3$		$L=0.5$		$L=0.7$	
	Delay / μ s	Efficiency	Delay / μ s	Efficiency	Delay / μ s	Efficiency
4 Gb/s, 0.4, 10 μ s	10.18	0.756	7.68	0.960	5.48	0.960
4 Gb/s, 0.6, 6 μ s	8.14	0.611	6.11	0.760	5.48	0.960
8 Gb/s, 0.4, 6 μ s	6.11	0.907	3.84	0.960	2.74	0.960
8 Gb/s, 0.6, 10 μ s	6.40	0.960	3.84	0.960	2.74	0.960

6 结 论

提出了一种面向下一代航电系统的组网方案——基于光分组交换网络的光纤通道技术(FC over OPS),研究了该方案下的数据块填装算法。通过软件和硬件仿真,分析了这种算法中的参数如发送带宽、最低效率门限、发送定时与网络实时性之间的关系,并得出了当最低效率门限取 0.6 以下并且负载不低于 0.3 时该算法可保证延时小于 10 μ s,从而使网络实时性得到改善。硬件原型设计和仿真表说明该算法的可行性。

参 考 文 献

- Ding Yongfei. Survey of airborne avionics bus system progress [J]. *Avionics Technology*, 2003, **34**(2): 1~7
- 丁勇飞. 机载航电总线系统发展评述[J]. 航空电子技术, 2003, **34**(2): 1~7
- Mike J. O'Mahony, Dimitra Simeonidou, David K. Hunter *et al.*. The application of optical packet switching in future communication networks[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2001, 128~135
- Tarek S. El-Bawab, Jong-Dug Shin. Optical packet switching in core networks: between vision and reality[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2002, 60~65
- Shun Yao, Biswanath Mukherjee. Advances in photonic packet

- switching; an overview[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2000, 84~94
- Huang Haoyi, Huang Dongshan, Xu Xiaofei. An application of fibre channel technology to avionics system [J]. *Avionics Technology*, 2005, **36**(3): 9~14
- 黄浩益,黄栋杉,徐晓飞. 光纤通道技术在航电系统中的应用[J]. 航空电子技术, 2005, **36**(3): 9~14
- Lin Qiang, Xiong Huagang, Zhang Qishan. Survey of fibre channel [J]. *Application Research of Computers*, 2006, **23**(2): 9~13
- 林 强,熊华钢,张其善. 光纤通道综述[J]. 计算机应用研究, 2006, **23**(2): 9~13
- Huang Yongkui. Fibre channel standards and its application in the avionics[J]. *Avionics Technology*, 2003, **34**(4): 1~12
- 黄永葵. 光纤通道标准及其在航空电子中的应用[J]. 航空电子技术, 2003, **34**(4): 1~12
- Xu Yajun, Xiong Huagang. Study on topology of FC interconnections in future avionic system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, **11**(4): 17~20
- 徐亚军,熊华钢. 未来航电系统 FC 互连的拓扑结构研究[J]. 电光与控制, 2004, **11**(4): 17~20
- Liu Fei. The Application of fibre channel to MIL-STD-1553 based avionics system networks[J]. *Aircraft Design*, 2007, **27**(3): 74~80
- 刘 飞. 光纤通道在基于 MIL-STD-1553 的航空电子系统网络中的应用[J]. 飞机设计, 2007, **27**(3): 74~80
- Lin Qiang, Xiong Huagang, Zhang Qishan. Packet scheduling for fibre channel switched fabric under hard real time constraints [J]. *Chin. J. Computers*, 2006, **29**(4): 570~575
- 林 强,熊华钢,张其善. 光纤通道交换机在强实时约束下的分组调度[J]. 计算机学报, 2006, **29**(4): 570~575