

# SpaceWire 时延抖动的仿真\*

侯剑儒, 陈晓敏

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

**摘要:** SpaceWire 总线是欧洲空间局为航天应用而设计的一种高速、点对点、全双工的总线网络。时延抖动是表征网络传输性能的关键参数, 它度量了端到端的最大传输时延和最小传输时延的差。通过建模仿真, 对于某特定应用场景下的 SpaceWire 总线的时延抖动进行了定量分析和研究。利用 Opnet 建立仿真模型, 通过仿真得出最大传输时延和最小传输时延, 从而统计出时延抖动。对时延抖动进行定性、定量的分析, 获得对时延抖动有影响的关键参数。根据分析结论, 提出了分优先级、分时和动态路由算法三种改善时延抖动的建议和方法。本文的研究成果对于构建低时延抖动的 SpaceWire 总线网络具有参考意义。

**关键词:** 时延抖动; 网络仿真; 星载网络

**中图分类号:** TP393.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1001-2486(2013)05-0114-06

## The simulation on the delay jitter of spacewire

HOU Jianru, CHEN Xiaomin

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract:** SpaceWire is the new space bus standard proposed by ESA, which has been successfully applied in many projects. Delay jitter is the key parameter to reflect the network transmission performance, which measures the difference between the maximum transmission delay and the minimum transmission delay from end to end. Through theoretical calculations and modeling simulations, a quantitative analysis and research for the delay jitter of the SpaceWire under specific application scenarios was carried out. Theoretical calculations obtained the delay jitter under particular scenarios by theoretical derivation. Modeling simulations, on the other hand, established simulation model by Opnet, and obtained the maximum transmission delay and minimum transmission delay by simulation. In this way, the delay jitter was calculated both qualitatively and quantitatively, and the parameters which have key impact on delay jitter were obtained. Recommendations and methods to improve the delay jitter were given by analyzing the conclusions. The research results of this article can provide a reference for the SpaceWire design to build a low delay jitter SpaceWire network.

**Key words:** delay jitter; network simulation; on-board network

SpaceWire 总线是欧洲空间局为航天应用而设计的一种高速、点对点、全双工的总线网络<sup>[1]</sup>, 它以 IEEE 1355-1995 和 LVDS 两个商业标准为基础, 汲取了 1394 技术、ATM 技术、以太网技术的优点, 同时考虑了空间应用的特点<sup>[2-4]</sup>。SpaceWire 标准相对于其他的数据传输协议较为简单, 在 FPGA 和 ASIC 上都可实现<sup>[5]</sup>。目前, 在 ESA、NASA、JAXA 以及国际空间站等的多个已经在轨飞行和将要发射的任务中, SpaceWire 技术都得到了成功的应用<sup>[6]</sup>。

随着空间网络结构复杂化和规模急剧扩展以及空间网络的应用多样化, 单纯地依靠经验进行网络的规划和设计、网络设备的研发以及网络协议的开发, 已经不能适应网络的发展。网络仿真

可以有效提高网络规划和设计的可靠性和准确性, 降低网络投资风险, 减少不必要的投资浪费<sup>[7]</sup>。OPNET 是目前网络仿真中应用最广泛的软件之一。由于 OPNET 没有提供标准 SpaceWire 模块, 无法直接进行 SpaceWire 网络仿真<sup>[8]</sup>。

时延抖动 (Delay Jitter) 是表征网络传输性能的关键参数, 它度量了端到端的最大传输时延和最小传输时延的差。对于传输带宽较大的业务流, 时延抖动越大, 就需要更大的发送和接收缓存。最大传输时延过长, 会造成网络的实时传输性能的降低, 使总线性能下降。时延抖动性能尤其对高带宽的图像和视频类业务的传输质量影响十分明显。同时高实时性的控制类业务也对总线时延抖动性能提出了较高的要求。目前, 各种卫

\* 收稿日期: 2013-04-26

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目 (XDA04060300)

作者简介: 侯剑儒 (1985—), 男, 山西太原人, 博士研究生, E-mail: houjianru@vip.sina.com;

陈晓敏 (通信作者), 女, 研究员, 博士生导师, chenxm@nssc.ac.cn

星上配备了越来越多的图像类有效载荷,时延抖动等参数始终是星载数据系统设计者所关注的。

本文通过建模仿真,对于某特定应用场景下的 SpaceWire 总线的时延抖动进行了分析和研究。创新之处在于,国内并没有研究者用 Opnet 对 SpaceWire 建立标准化模型,本文所建立的模型可以用于其他相关的研究,该模型易于搭建和使用,其本身具有意义。另外,本文利用仿真的手段分析了时延抖动的情况,提出了三种可行的解决方案,其研究成果对于构建低时延抖动的 SpaceWire 总线网络具有重要的参考价值。

### 1 星载数据业务传输类型

卫星上数据类业务主要为载荷设备采集的科学数据。其中控制类业务又可分为控制星载智能设备或非智能设备运行的控制指令;提供网络全局时间基准,实现网络中通信时间窗口划分和调度的全局网络时钟信号;监测网络中节点工作状态和运行参数的家政管理类数据以及支持多星载智能设备并行处理的报告类指令<sup>[9]</sup>。在空间数据网络中,对数据流的服务质量要求主要体现为数据传输延时、传输带宽和可靠性这3个指标,不同数据流的 QoS 要求也是不同的,对不同数据类型的 QoS 要求如表 1 所示<sup>[10]</sup>。

表 1 星载数据业务传输类型

Tab.1 Types of onboard data transmission

业务类型	带宽	实时性 (时延抖动)	数据 可靠性
控制类业务	低	中	高
高实时性 数据类业务	高	高	低
低实时性 数据类业务	中	低	中

在表中提到了不同业务对于实时性的要求是不一样的,相对来说,控制类业务的重要性高,一般是相对短的包(占用带宽比较低),但是对于实时性要求高。而视频等数据业务,占用带宽相对多,对时延抖动的要求相对低(根据其是否是实时显示有差别,但是都相对于控制命令有更低的实时性)。在 SpaceWire 的标准中,由于存在蛀洞路由,即包并不是由路由器存储转发的,而是在包头通过路由器之后一个个分片逐次通过路由器,并不存储,这样会使得当一个包通过路由时,其他的包无法使用该出口(如果路由是存储整个再转发就不会出现这种问题,因为短包先到就会先发,而长包还没全部

到,不会先占用出口)。这样将有可能导致控制命令在大的数据包之后,无法发出,造成较大时延。下面通过仿真对这个问题进行具体的说明。

### 2 SpaceWire 模型描述

OPNET 一般模型分为 Network、Node 和 Process 三个层次,其图形界面如图 1 所示<sup>[11]</sup>。

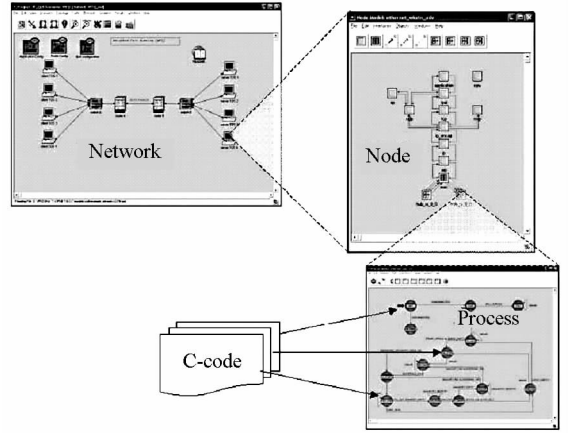


图 1 Opnet 层次模型

Fig.1 Layered model of Opnet

Network 模型是最高层次的模型,由网络节点(Node)和连接网络节点的通信链路(link)组成,由该层模型可直接建立起仿真网络的拓扑结构。Node 模型由协议 Module 和连接 Module, TCP Module、Application Module、packet stream、statistic wires 等组成。每个 Module 对应一个或多个 Process 模型,Process 模型由有限状态机来描述,有限状态机用 C 语言编程。用户可以在上述三个层次的任何地方切入编程,建立所需的 Network、Node 或 Process 模型<sup>[12]</sup>。

节点模型包括一个简单发包源,路由层进程,链路层进程和接收发送器,如图 2 所示。

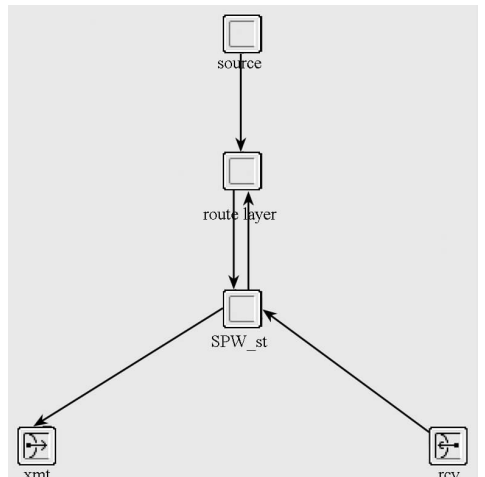


图 2 节点模型

Fig.2 Node model

简单发包源可以用来创建规定长度的包,并将其按照规定函数分布的间隔以及规定的起始时间发送出去。路由层接受源的包并且转发到链路,收集链路的 N-char 并将其合并成完整的包。设置路由层的原因在于方便路由模型的建立。因为在 SpaceWire 标准下,N-char 逐次通过路由,而不是整个包一起通过。

链路层从路由层接收到源发来的包,通过状态机判定目前的状态,状态转移图如图 3 所示。

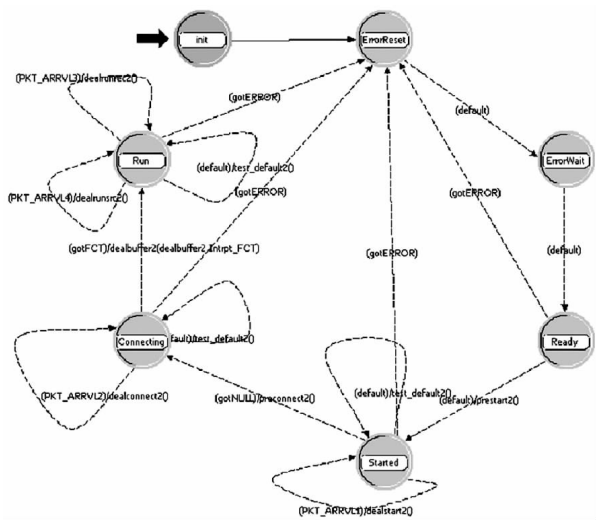


图 3 节点链路层模型  
Fig. 3 Linked model of nodes

在模型中,使用 op\_sar\_buf\_create 系列函数,将从路由层收到的包分成 1 字节大小的 N-char,并将其送入 FIFO(FIFO 直接用 C 程序写成,并没有使用 OPNET 中的队列)。FIFO 判断 credit 大于 0 时,将 N-char 发送。同时,本模型模拟了计算机处理包的延时,并将其设为一个可以设定的值。

本模型中路由为四端口路由,包括 4 个发送和接收机,4 个链路层进程,及一个路由进程。如图 4 所示。

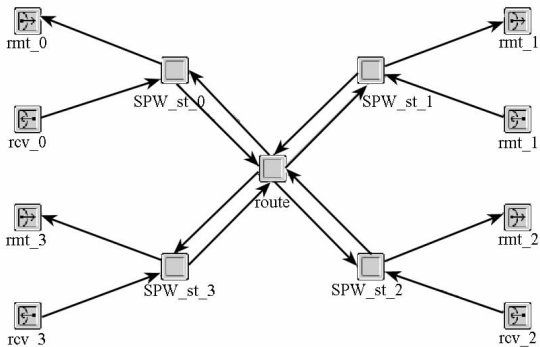


图 4 路由模型  
Fig. 4 Route model

其中链路层进程和节点模型中基本一样,增加了一个中断处理,用于当端口被占用时堵塞数

据包的传输,以保证在一个数据包通过路由时不会有其他数据包在中途通过同一个端口传送。

路由进程将收到的 N-char 转发至相应的出口,路由表为内置,需要在仿真开始之前先设置好。在模型中,N-char 逐个通过路由节点,只有当一个包完整通过之后,其他数据包才会再抢占发送端口,体现了标准中虫孔路由的内容。

### 3 SpaceWire 时延抖动仿真分析

在前面分析中,提到了在 SpaceWire 标准下,高速的数据设备发出的数据有可能会堵塞低速控制命令业务。为了对该情况进行仿真,本文构思了这样一种拓扑结构。

构建路由器链式拓扑,低速设备 node\_0,高速设备 node\_2 和 node\_5 分别接在 4 端口路由 node\_4 和 node\_6 上,7 为热模块(如 CPU,大容量存储器)连接到 4 端口路由器上,路由器互连形成链式拓扑结构。外围节点 node\_2 和 node\_5 发送的数据流为 fn1 和 fn2,其中 fn1 为控制类低速低实时性数据流,fn2 为高速设备发送的数据流。这样做的目的是让高速设备 node\_2 与 node\_5 对 node\_0 造成堵塞,从而达到仿真的目的。

使用 Opnet 软件建立如图 5 所示场景。

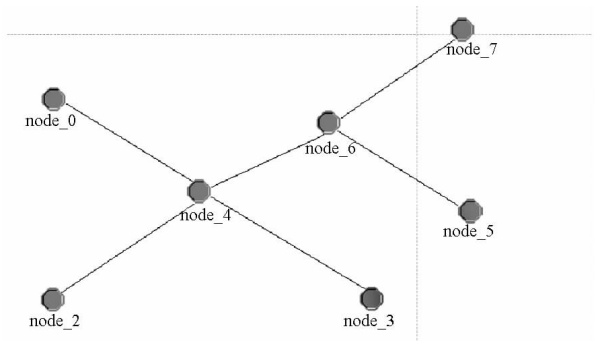


图 5 时延抖动仿真场景  
Fig. 5 Simulated scene of the delay jitter

其中,node\_0,node\_2 和 node\_5 是发包节点。发出数据的间隔,可以设置为各种函数分布。在这里将 node\_0 发包分布设为常量,而将 node\_2 和 node\_5 发包分布设为随机分布,即 uniform 模式。这样 node\_0 被统计的时候,数据包间隔一致,容易对比,而 node\_2 和 node\_5 随机发包,便于制造碰撞。

节点 node\_4 和 node\_6 为路由节点,在 node\_7 只统计 node\_0 发出的数据包端到端延时。为了在仿真中更加直观地看到包被阻塞,以至于端到端延时增大的情况,设置 node\_0 在 0.01s 的仿真时刻发包,node\_2 在 0.009998s 时刻发包,

node\_5 在 0.009999s 时刻发包。首先,设定让三个节点均发送 1024bit 大小的包。node\_0 发包间隔为 0.0001 的常数,一共发包 100 个。node\_2 和 node\_5 发包间隔均为 0.0001s 到 0.0002s 之间的随机数。仿真统计了如图 6 所示结果。

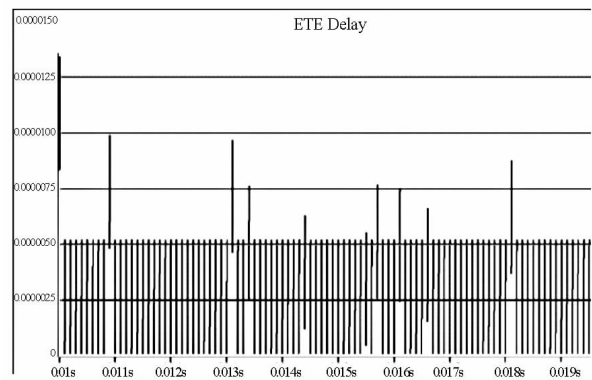


图 6 低速情况下仿真结果

Fig. 6 Simulation results under low speed

在图中统计量为端到端延时,其每一道竖线为连续的 128 个点组成,每个点代表一个 N-char 的延时。因为在仿真中端到端延时是从包创建开始记录时间,而每个 N-char 接收到记录结束时间,因此,每一个 N-char 的端到端延时逐次递增。而每条竖线的最高点,即为该数据包的端到端延时。该图所示是仿真结果的前 0.02s。由于整个仿真的图像每一段都是相似的,所以都取前 0.02s 作为比较的基础。虽然图像所示时间比较短,但是已经可以在这样的仿真结果看到,由于阻塞,部分包的延时会大于一般的包,其中第一个包的延时尤其明显,这是在设置发包时间的时候故意造成的阻塞,符合最开始的预期。

在上述情况中,node\_5 发包速度与 node\_0 相当,因此除去第一个包在设计下体现了比较大的延时,总体延时比较平缓。而在预先计划中,node\_5 为高速设备,当 node\_5 以随机分布在 0.00001s 到 0.00002s 之间的函数发包时(即比上述情况增大 10 倍),可以得到如图 7 所示的统计结果。

这说明在没有高层路由协议的情况下,高速设备会对高实时性设备干扰,大大增加高实时性设备的端到端延时。而在极端情况下,node\_5 节点以随机分布在 0.000005s 到 0.000006s 之间的函数发包(即接近链路总容量)。得到如图 8 所示统计结果。

如图可以看出,端到端延时逐次增高,这是由于 node\_5 占用了几乎全部链路,导致总是在路由 node\_6 发生碰撞,而本程序路由在碰撞时采用随机选择,同时本程序在包创建时刻开始计时,导致

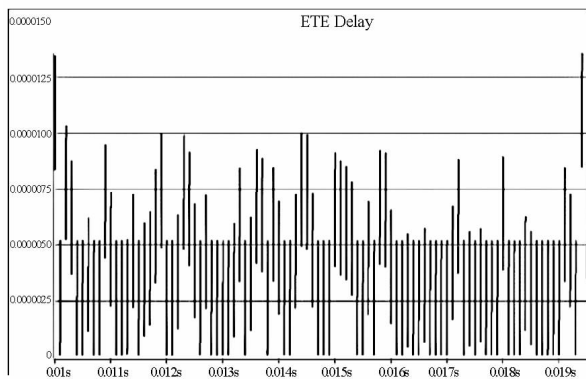


图 7 高速情况下仿真结果

Fig. 7 Simulation results under high speed

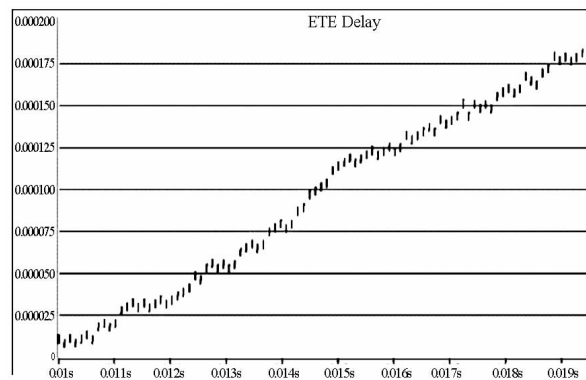


图 8 极端情况下仿真结果

Fig. 8 Simulation results under extremely high speed

了这样的极端结果。此时可以看到 node\_5→node\_6 的链路占用率如图 9 所示。即发包之后就一直接近 100%,这正是说明了 node\_5 高速设备占用了 node\_6 路由向 node\_7 的出口,而这种占用正是由 SpaceWire 蛀洞路由这一特性造成的。

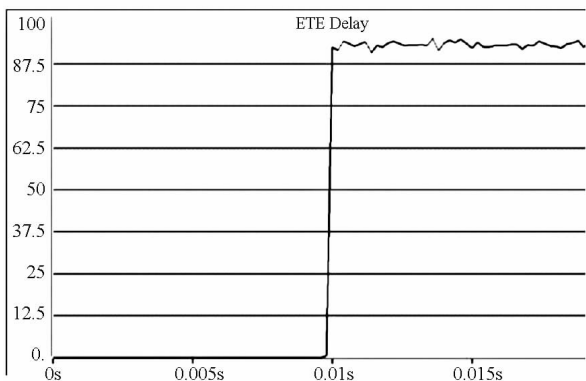


图 9 极端情况下链路占用率

Fig. 9 Link occupation under extremely high speed

#### 4 SpaceWire 时延抖动问题的改善方法

在上述仿真过程中可以看出,由于 SpaceWire 标准缺少高层协议,可能会导致实时性高的数据不能按时到达。如果仅针对最后所述的极端情况,路由的优先级轮转即可以解决这种问题。但如果想有效地控制某一源的时延抖动,在这里提

出如下三种方案：

(1)分优先级路由

当有高优先级的数据包进入路由之后,即刻停止低优先级数据包的发送,并发送高优先级数据包,将低优先级数据包进行缓存。等待高优先级数据传输结束,再继续传输低优先级数据包。这种方式其最大的问题是由于在目前标准下,数据包仅有包头包含路由信息,当低优先级数据包被缓存之后,再次被发送时,需要重新为其构建包头,否则,之后的路由将不知道其准备发往何处。这样的做法在极端情况下将会导致很多新构建的包头,对于传输的简洁性以及数据包的重新恢复都会造成很多不利影响。因此,虽然这是一种解决方案,但是针对 SpaceWire 的特殊情况,其难以实现,同时还可能带来其他问题。

(2)分时间片路由

将路由行为分成多个时间片,把每个时间片分配给不同的路由端口,使得每个端口都可以公平地得到路由,而不同的时间片被分给不同的节点所对应的路由端口,这样可以保证每个节点都可以有足够的时间完成自己的传输,从而避免拥塞,避免仿真中极端情况出现的可能性,减少最坏情况下的最大时延,从而平滑时延抖动。

可以想象,分时间片路由是相对容易实现的解决方案,并且对 SpaceWire 标准的改动是最小的。建立类似于前述的模型进行仿真,如图 10 所示。

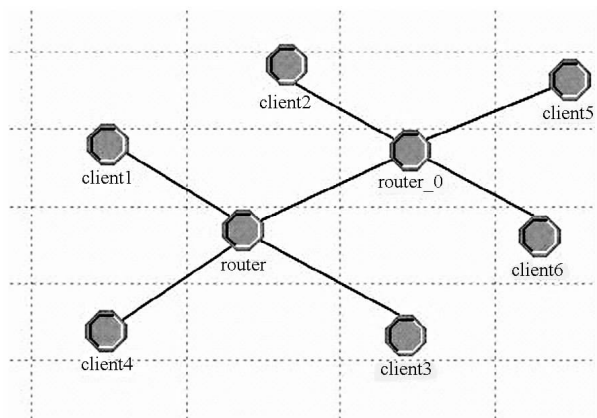


图 10 分时间片路由协议的仿真场景

Fig. 10 Simulation scene of time - slice route protocol

其中 Client1 为要观察的发送节点(模拟一个发送控制命令的节点),其在 0.1s 时开始发包,发包频率固定为 0.001s,包的长度是 512bit。同时设置另一个高速节点 Client2(模拟很高数据量的节点,例如摄像头等),其于 0.11s 开始发送数据,发送包的长度为 1024bit,发包间隔为 0.0001 ~ 0.00015 之间的随机数。其他节点都设为接收节

点。Client1 和 Client2 发包地址都指向 Client5。可以从 Client5 得到如图 11 所示的仿真结果。

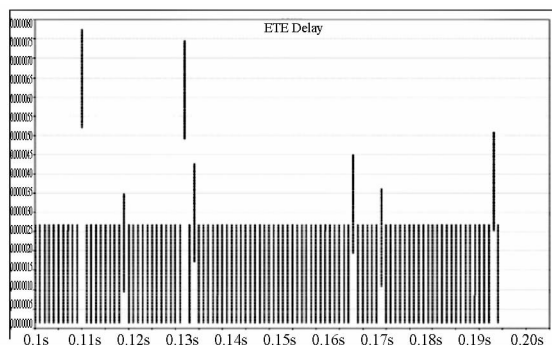


图 11 该场景下未分时间片时 Client1 的时延抖动情况

Fig. 11 Delay jitter of Client1 not using time-slice route protocol under above scene

为了消除该图中的时延抖动现象,设计如表 2 所示分时间片路由时间表。

表 2 分时间片路由时间表安排

Tab. 2 Schedule of time-slice route under above scene

节点	调度时间	发包间隔
Client1	0s ~ 0.01s	0.001s
Client2	0.01s ~ 0.08s	0.0001s ~ 0.00015s
Client3	0.08s ~ 0.1s	0.0001s

利用上表进行发包,其中每 0.1s 为一个循环,在每 0.1s 中调度时间如上述所示,则可以得到如图 12 所示仿真结果。

图 12 中三个图依次表示 Client1, Client2 和 Client3 所发送的包,在 Client5 收到时计算的端到端延时。Client1 的包到达的端到端延时稳定,是 0.00000267s,而不再有不稳定性。可以看到在引入调度表机制之后,冲突是不可能发生的。高速数据可以获得比较长时间的发包权利,因此也可以满足实际的需求,而控制命令也可以在预设的时间发送。在实际的应用中,通过缩小时间片的大小,还可以使得控制命令的实时性得到进一步的提高。该仿真仅体现了发送数据包的部分,但是由于 SpaceWire 是全双工的总线网络,接收和发送实际上是完全对称的,因此发送部分的仿真完全可以类推到接收部分。

分时间片路由可能存在的问题是,由于静态分配时间片,可能导致部分时间片的闲置。同时,虽然时延抖动得到了消除,但是代价是每个包的延时都相对增加了(因为在非其时间片时不能传输)。虽然可以通过细化时间片来使得该延时增加得到控制,但是由于和分优先级路由相似的问题,不能将包拆分,所以一个时间片最小应该受限

于该应用中最大的单个发包时间。

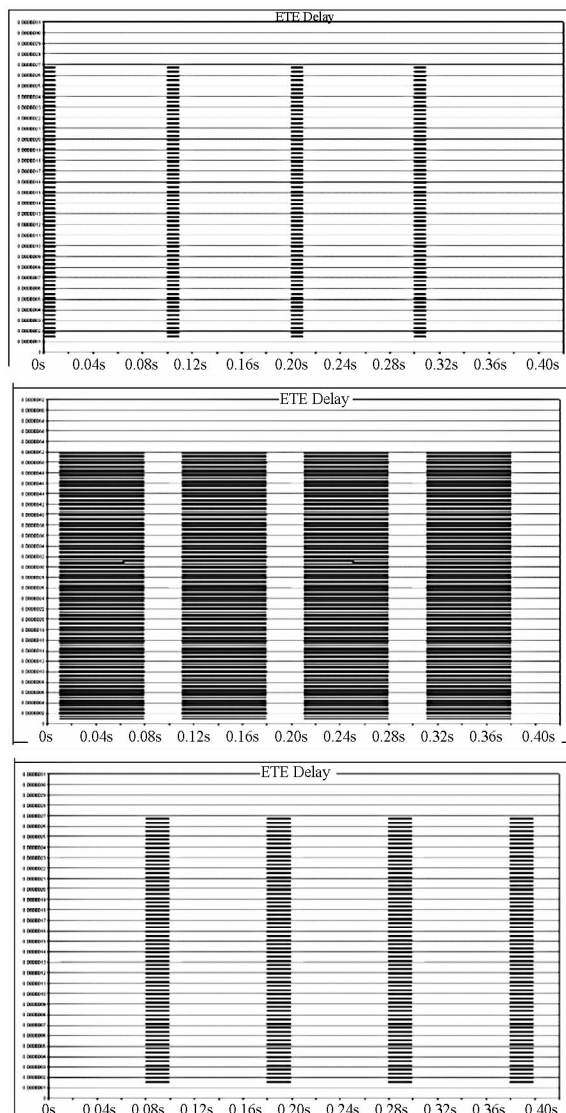


图 12 有时间片情况下的仿真结果

Fig. 12 Delay jitter of Client1 using time-slice route protocol under above scene

### (3) 利用空闲路由

可以设计一种路由算法,在静态路由表中设计首选路由和次选路由。当首选路由被堵塞时,如果次选路由空闲,则使用次选路由进行传输。这样也可以避免一直拥塞的情况。这种算法需要配合拓扑结构的设计,如图 13 所示。图中为了方便,使用的是五端口的路由器,其中可以看到,当 router0 向 router2 的路径发生拥塞时,次选路由 router1 是空闲的,则可以通过 router1 转发至 router2,从而避免一直在 router0 处等待。可以做一个简单的仿真,在这种路由算法下,让 client8 发送数据到 client6, client2 发送到 client5, client2 以 client8 一半的几率随机发送,其发送数据包的长度为 80bit,而 client8 为 256bit。可以得到如图 14 所示仿真图形。

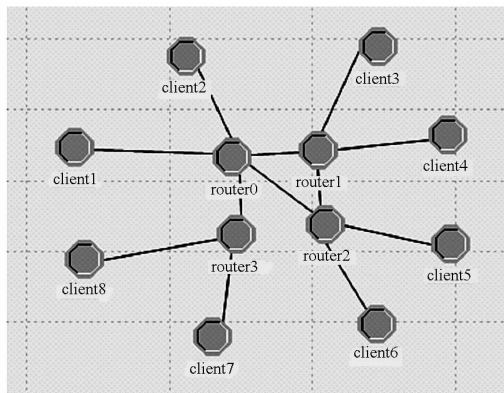


图 13 存在次选路由的场景

Fig. 13 Simulation scene when route protocol includes second choice

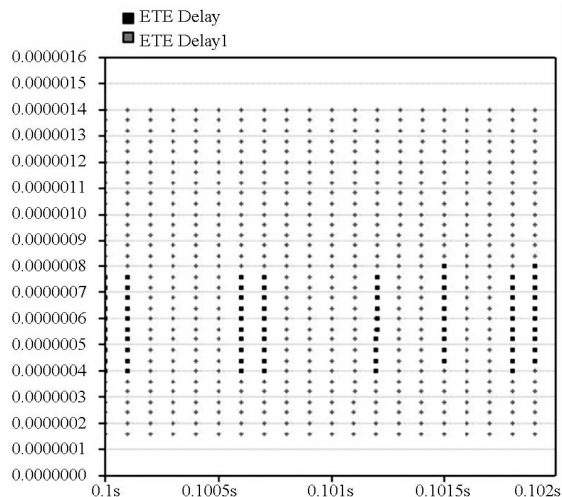


图 14 存在次选路由的仿真结果

Fig. 14 Simulation results when route protocol includes second choice under above scene

其表示当 client2 发送数据时,并不因为 client8 占用了 router0 到 router2 的路径而导致在浅色虚线上面等待,而是选择了 router1 转发,使得在 client8 数据没有发送完毕之前,深色的虚线就已经发送完了,这样也可以平滑时延抖动。该路由算法,涉及对数据包缓存的改动(在 SpaceWire 原标准中,数据包缓存在发送端,而这个算法需要缓存在接收端)。对于这个算法,我们在另外一篇文章中进行了更详细的讨论。

## 5 结论

本文通过仿真对 SpaceWire 的时延抖动问题进行研究。说明了时延抖动问题对于不同的传输业务可能造成不同的影响,并描述了极端情况下时延抖动对于传输数据可能造成的危害。同时,提出了三种可能的解决方案,并逐一给出了仿真结果。本文的研究成果对于构建低时延抖动的 SpaceWire 总线网络提供参考。  
(下转第 134 页)

- [7] Zhang X, Liu Z, Liu Y, et al. Elastic wave band gaps for three-dimensional phononic crystals with two structure units [J]. *Phys. Lett. A*, 2003, 313(5-6):455-460.
- [8] Liu Z Y, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. *Science*, 2000, 289: 1734-1736.
- [9] 温激鸿,王刚,刘耀宗,等. 周期弹簧振子结构振动带隙及隔振特性研究[J]. *机械工程学报*,2005,41(2):205-209. WEN Jihong, WANG Gang, LIU Yaozong, et al. Research on vibration band gaps and characteristic of vibration isolation of periodic mass-spring structure [J]. *Chin. J. Mech. Engineering*, 2005, 41(2): 205-209. (in Chinese)
- [10] 文岐华,左曙光,魏欢. 多振子梁弯曲振动中的局域共振带隙[J]. *物理学报*,2012,61(3):034301. WEN Qihua, ZUO Shuguang, WEI Huan. Locally resonant elastic wave band gaps in flexural vibration of multi-oscillators beam[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(3): 034301. (in Chinese)
- [11] Fang N, Xi D J, Xu J Y, et al. Ultrasonic metamaterials with negative modulus [J]. *Nature Mater.*, 2006, 5(6): 452-456.
- [12] Sugimoto N, Horioka T. Dispersion characteristics of sound waves in a tunnel with an array of Helmholtz resonators[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, 97(3): 1446-1459.
- [13] Cheng Y, Xu J Y, Liu X J. One-dimensional structured ultrasonic metamaterials with simultaneously negative dynamic density and modulus [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, 77(4): 045134.
- [14] Wang Z G, Lee S H, Kim C K. Acoustic wave propagation in one-dimensional phononic crystals containing Helmholtz resonators[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008,103: 164907.
- [15] Chen H Y, Chan C T. Acoustic cloaking and transformation acoustics[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010,43: 113001.
- [16] Sigalas M M. Elastic wave band gaps and defect states in two-dimensional composites[J]. *J. Acoust. Soc. Am*,1997,101(3):1256-1261.
- [17] Zhao Y C, Wu Y B, Yuan L B. Characteristics of the localized modes in 2D phononic crystal with heterostructure point defect[J].*Phys. Scr.*, 2009,80: 065401.
- [18] Qiu C Y, Liu Z Y, Shi J, et al. Directional acoustic source based on the resonant cavity of two-dimensional phononic crystals[J].*Appl. Phys. Lett*, 2005,86(22): 224105.
- [19] Wu L Y, Chen L W, Liu C M. Acoustic energy harvesting using resonant cavity of a sonic crystal [J]. *Phys. Lett.*, 2009,95(1): 013506.
- [20] 王勛成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社,2003. WANG Xucheng. *Finite element method* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [21] 刘敏,侯志林,傅秀军. 二维正方排列圆柱状亥姆赫兹共振腔阵列局域共振声带隙研究[J]. *物理学报*,2012,61(10):104302. LIU Min, HOU Zhilin, FU Xiujun. Local resonant acoustic band gaps in two-dimensional square-arranged Helmholtz resonators array [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(10): 104302. (in Chinese)

(上接第 119 页)

## 参考文献 (References)

- [1] Jameux D. Network management and fdir for spacewire networks [C]//Proceedings of International SpaceWire Conference, Dundee, 2011:55.
- [2] ECSS. EECS - E50 - 53C. Space Engineering: SpaceWire-CCSDS packet transfer protocol[S]. 2010.
- [3] 杨志,李国军,杨芳,等. SpaceWire 星载网络通信协议设计[J]. *宇航学报*, 2012(2): 200-209. YANG Zhi, LI Guojun, YANG Fang, et al. Design of communication protocol for SpaceWire on-board networks[J]. *Journal of Astronautics*, 2012(2):200-209. (in Chinese)
- [4] 陈熙之,刘晓锋,杨明川. SpaceWire 总线网络实时传输性能研究[J]. *通信技术*,2012,9: 93-99. CHEN Xizhi, LIU Xiaofeng, YANG Mingchuan. Research on real-time transmission performance of SpaceWire network[J]. *Communications Technology*,2012.09: 93-99. (in Chinese)
- [5] Eganyan A, Koblyakova L, Suvorova E. SpaceWire network simulator [C]//Proceedings of International SpaceWire Conference, Dundee, 2010:403-406.
- [6] Roberts D, Parkes S. SpaceWire missions and applications [C]//Proceedings of International SpaceWire Conference, Dundee,2010:431-435.
- [7] 张铭,窦赫蕾,常春藤. OPNET Modeler 与网络仿真[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007. ZHANG Ming, DOU Helei, CHANG Chunteng. *OPNET modeler and network simulation*[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2007. (in Chinese)
- [8] Suvorova E, Onishchenko L, Eganyan A. SpaceWire network functional model[C]//Proceedings of International SpaceWire Conference, Dundee, 2007:201-204.
- [9] 郭林. 基于 SpaceWire 的空间数据网络关键技术研究[D]. 中国科学院空间科学与应用研究中心,2011. GUO Lin, STUDY on key technology of spaceWire for On-board data bus network [D]. Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [10] Yamada T. Quality of service requirements for a higher layer protocol over SpaceWire to support spacecraft operations [C]//Proceedings of International SpaceWire Conference, Dundee, 2010:381-384.
- [11] Fournier P, Girard A, Provost-Grellier A, et al. Simulation of a SpaceWire network [C]//Proceedings of International SpaceWire Conference, Dundee, 2010:357-366.
- [12] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2004. CHEN Min. *OPNET network simulation* [M]. Beijing: Tsinghua University press,2004. (in Chinese)