

一种基于网络配置文件的光纤通道网络时延特性模拟方法

王萌¹ 李雯¹ 张潘頔¹

WANG Meng LI Wen ZHANG Pandi

摘要

现代航空电子系统对机载网络的可靠性和性能要求日益提高, 光纤通道 (fibre channe, FC) 网络因其高带宽、低延迟的特性成为关键技术。然而, 随着系统复杂性的增加, FC 网络的拓扑结构和数据交互关系变得愈发复杂, 对其时延特性进行准确模拟和分析显得尤为重要。基于此, 文章提出了一种基于网络配置文件 FC 网络时延特性模拟方法, 通过自动化提取 XML 格式网络配置文件中的关键参数 (如端口速率、交换机延迟、链路延迟等), 构建时延模型, 利用仿真技术进行时延特性分析。实验结果表明, 该方法能够有效地模拟不同配置和负载条件下的 FC 网络时延特性, 为优化网络配置、提升系统性能提供了可靠依据, 并为未来 FC 网络的设计和优化提供了重要参考。

关键词

光纤通道网络; 时延特性; 网络仿真; 网络配置文件; 航空电子系统

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.025

0 引言

现代航空电子系统中, 机载网络的可靠性和性能至关重要^[1]。光纤通道 (fibre channel, FC) 网络作为高带宽、低延迟的技术, 广泛应用于机载系统中, 以满足数据传输需求^[2]。FC 网络通常采用星型拓扑, 通过光纤连接交换机与节点机, 实现高效传输。根据数据优先级, FC 网络提供 1 Gbit/s 及以上的传输速率, 保障系统实时性和可靠性。随着功能扩展和设备交联增加, FC 网络拓扑与数据交互愈加复杂, 准确模拟其时延特性对优化配置和提升系统性能至关重要^[3]。网络仿真利用数学建模和统计分析来模拟网络行为, 通过建立设备和链路的统计模型, 模拟流量传输, 以获取网络设计和优化所需的性能数据^[4]。该方法可在实际部署前分析网络性能, 避免高成本的实物测试, 尤其适用于复杂的 FC 网络环境^[5-7]。

随着现代航空电子系统功能的扩展, FC 网络的拓扑结构和数据交互变得更加复杂。在此背景下, FC 网络特性模拟需重点关注以下方面:

- (1) 节点机数据收发特性: 包括数据的发送、接收及优先级处理。
- (2) 网络交互数据特性: 包括数据包的传输路径、延迟和带宽占用。
- (3) 交换机转发特性: 包括数据包在交换机中的转发延迟及处理机制。

大规模 FC 网络模拟需大量共享数据信息输入, 传统方法工作量大且易出错, 影响了模拟效率和准确性。当前 FC 网络时延特性研究集中在三方面:

- (1) 通过仿真模型分析不同配置和负载下的时延特性, 但难以自动适应多变的网络环境^[8]。
- (2) 从网络配置中提取关键参数进行时延分析, 但方法多为单一, 难以全面反映复杂环境^[9]。
- (3) 通过优化交换机配置、端口速率和路由算法来降低时延, 然而优化策略依赖特定环境, 缺乏通用性^[10]。

为解决上述问题, 本文提出了一种基于配置文件的 FC 网络时延特性模拟方法。该方法通过自动化解析网络配置文件, 提取端口速率、交换机和链路延迟等关键参数, 构建时延模型, 并利用仿真技术模拟 FC 网络的时延特性。本文的主要贡献包括:

- (1) 自动化参数提取方法;
- (2) 基于关键参数的全面时延模型;
- (3) 通过仿真实验验证方法的有效性, 并分析不同配置对时延的影响。

实验结果表明, 该方法有效模拟了 FC 网络的时延特性, 为网络优化提供了重要参考。

1 FC 网络仿真技术原理

1.1 网络仿真技术原理

网络仿真技术通过建立网络设备 (如路由器、交换机、服务器) 和链路的数学模型, 模拟数据包传输过程, 以反映设备行为和协议运行机制。通过调整模型参数, 仿真可模拟

1. 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所
陕西西安 710000

不同的拓扑结构、流量模式和负载条件,从而全面分析网络性能^[11]。FC网络通常采用星型拓扑,由交换机和节点机组成。仿真中需为每个设备建立精确模型,交换机模型包括端口数、端口速率、转发机制等;节点机模型描述其数据收发特性,这些模型共同构成FC网络的虚拟拓扑。如图1所示。

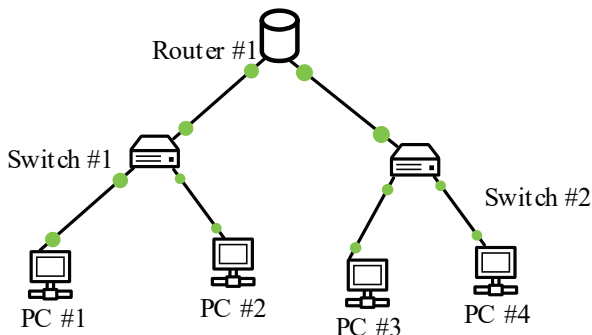


图1 FC网络星型拓扑结构

解析网络配置文件可以自动生成上述模型,配置文件中包含设备连接关系、端口状态、链路特性等关键信息,显著降低手动建模工作量,并确保仿真环境与实际网络高度一致。在网络运行中,数据包在设备间传输并经历以下仿真阶段:

- (1) 数据包生成:节点机按配置文件中的规则生成数据包,并为其分配时间戳;
- (2) 交换机转发:交换机根据优先级处理数据包,计算其输入、转发和输出时延;
- (3) 数据包接收:目标节点机接收数据包,记录到达时间以计算端到端延迟。

这些过程通过事件驱动机制实现,每个事件(生成、转发、接收)均由仿真引擎按特定时间触发并处理。

1.2 XML 格式数据

(extensible markup language, XML)是一种用于表示结构化信息的标记语言。被设计为具有良好的人类可读性,同时也可以由机器轻松解析。XML的主要用途包括数据交换、配置文件、文档存储等^[12]。XML文档的基本结构包括声明、元素和属性。总之,XML是一种强大且灵活的标记语言,广泛用于数据存储和交换。了解和掌握XML的基本概念和用法对于处理结构化数据非常有帮助。图2是一个典型的FC网络配置XML文件示例,展示了一个简单的FC网络配置:一个交换机(SW1)与两个节点机(Node1、Node2)的连接关系及其端口配置。此外,还定义了节点机发送消息的优先级、大小及发送间隔。

XML在FC网络仿真中起到了关键的数据载体作用,通过其灵活的结构和可扩展性,将复杂的网络拓扑、设备配置及流量模型以直观的层级形式进行描述。仿真工具通过解析XML文件,可以自动生成网络设备模型、定义流量特性,并

校验网络配置的正确性,从而为时延特性分析提供精准的数据支撑。XML在FC网络仿真中的应用具有以下优势:

首先,其结构清晰,能够有效管理复杂的网络配置;其次,具有良好的可扩展性,可以轻松适应不同的网络需求;最后,作为一种标准化的数据格式,XML便于与各种仿真工具和分析平台高效集成,从而提高仿真工作的自动化程度和可靠性。

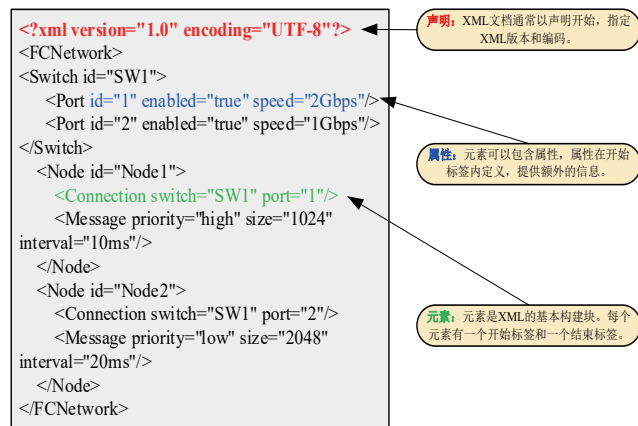


图2 典型的FC网络配置XML文件示例

2 基于配置文件的FC网络时延模拟方法

鉴于此,本文提出一种基于网络配置文件的FC网络时延特性模拟方法,对可扩展标记语言(extensible markup language, XML)格式的FC网络配置文件中FC网络节点机和FC网络交换机的连接关系信息开展正确性校验,对FC网络配置文件进行数据分析和信息提取,建立FC网络节点机和交换机列表,通过对网络数据发送、转发和接收的传输过程进行模拟,实现FC网络特性模拟以及FC网络应用层、链路层端到端时延等的评估。可有效减少手动输入网络设备特性、网络拓扑架构、消息特性等信息的工作量,提高输入文件一致性和正确性,极大地提升了FC网络时延特性模拟的效率。

第一阶段:外部导入和正确性检查。首先支持外部导入XML格式的FC网络配置文件,并对节点机和交换机的关联关系进行正确性检查。具体步骤如下:

步骤1:导入FC网络配置文件。

步骤2:验证连接节点机的交换机对应端口是否在FC交换机中进行端口使能,若有未使能情况,进行报错并提示错误原因。

步骤3:验证需要级联的交换机之间级联端口设置是否正确,不正确则进行报错并提示错误原因。

第二阶段:数据分析与信息提取。具体步骤如下:

步骤1:遍历FC网络配置文件,提取FC节点机信息,建立FC网络节点机列表。

步骤 2：建立节点机发送机制，模拟数据源根据发送消息列表的属性产生仿真消息的发送时间和消息内容；在仿真消息产生时标识仿真消息产生时间戳 $MsgGentime$ ，并将该消息放入对应分区的发送消息队列中；节点按照发送消息的优先级从每个分区读取仿真消息并进行发送，当仿真消息完成发送时，标识该仿真消息发送时间戳 $MsgTxtime$ 。

步骤 3：建立节点机接收机制，仿真消息到达节点后，标识仿真消息到达时间戳 $MsgArvtime$ ，节点按照数据的目的应用 ID，将该消息放在对应分区的接收缓冲区中，并从分区中接收数据，标识仿真消息接收时间戳 $MsgRxtime$ 。

第三阶段：交换机模拟。具体步骤如下：

步骤 1：遍历 FC 网络配置文件，提取 FC 交换机信息，建立 FC 网络交换机列表。

步骤 2：建立交换机转发机制，模拟数据到达交换机物理端口时，标记仿真消息在交换机的到达时间戳 $SWInporttime$ ，判断该消息是单播还是组播消息，进行相应的转发模拟，并将仿真消息存放在对应输出端口的输出队列中。

步骤 3：建立交换机输出机制，交换机每个端口按照仿真消息的优先级从对应输出队列中读取仿真消息并进行输出，标记仿真消息在交换机的输出时间戳 $SWOutporttime$ ，依次轮询交换机全部使能端口读取仿真消息并进行输出。

第四阶段：延迟计算。具体步骤如下：

步骤 1：计算消息应用层端到端的延迟，公式为 $MsgAppEtEDelay = \text{仿真消息接收时间戳} - \text{仿真消息产生时间戳} - MsgGentime$ 。

步骤 2：计算消息物理链路端到端的延迟，公式为 $MsgLinkEtEDelay = \text{仿真消息到达时间戳} - MsgArvtime - \text{仿真消息发送时间戳} - MsgTxtime$ 。

步骤 3：计算消息在交换机的延迟，公式为 $MsgSwDelay = \text{仿真消息在交换机的输出时间戳} - SWOutporttime - \text{仿真消息在交换机的到达时间戳} - SWInporttime$ 。

通过上述技术方案，本文实现了 FC 网络特性模拟和评估，减少了手动输入网络设备特性、网络拓扑架构、消息特性等信息的工作量，提高了输入文件的一致性和正确性，极大提升了 FC 网络时延特性模拟的效率和准确性。

3 仿真结果分析

为了评估本文提出的方法在不同网络配置和负载条件下的性能，本节通过多组仿真实验对 FC 网络的时延特性进行了详细分析。实验采用真实的 FC 网络配置文件作为输入，模拟了节点机数量、端口速率、链路延迟、数据包大小和负

载条件等变量对网络时延的影响。

表 1 展示了节点机的相关属性及其配置，实验设置了不同数量的节点机（10、20、30、40），以评估节点机数量对网络时延的影响。

实验通过模拟不同网络配置和负载条件下的 FC 网络运行情况，评估网络时延特性，并分析不同因素对时延的影响。这些仿真实验在一个基于 Python 的网络仿真平台上进行，使用真实的 FC 网络配置文件作为输入。实验采用星型拓扑结构，包括一个 FC 交换机和多个 FC 节点机。节点机数量分别设置为 10、20、30 和 40，以评估节点机数量对网络时延的影响。FC 网络端口速率设置为 1、2、4 Gbit/s，以模拟不同带宽条件下的网络性能。链路延迟设置为 0.1、0.5、1 ms，反映不同物理链路条件下的延迟特性。数据包大小设置为 512、1 024、2 048 Byte，以评估数据包大小对时延的影响。采用泊松分布模型生成仿真消息，设置不同的消息成功到达率（10、20、50 条/s），模拟不同负载条件下的网络性能。

表 1 FC 网络节点列表

序号	标识	内容
第 1 个节点机列表		
节点机属性列表		
1	NodeName	节点机名称
2	LocalPortID	本地 PortID
分区列表		
3	PartID	分区 ID
4	PartName	分区名称
发送消息列表		
5	MsgID	消息号
6	MsgLength	消息长度
7	Priority	消息优先级
8	ServiceType	服务类型
9	SrcAppID	源应用 ID：本节点的本地 PortID
10	DstAppID	目的应用 ID：该消息目的分区所在节点机的 LocalPortID
接收消息列表		
11	MsgID	消息号
12	MsgLength	消息长度
13	Priority	消息优先级
14	ServiceType	服务类型
15	SrcAppID	源应用 ID：该消息源分区所在节点机的本地 PortID
16	DstAppID	目的应用 ID：本节点的本地 PortID
...		
第 N 个节点机列表		

表 2 展示了不同端口速率对网络时延的影响，是实验中得到的完整数据结果。在节点机数量为 20、链路延迟 0.1 ms、

数据包大小 512 Byte 的条件下, 端口速率从 1 Gbit/s 提升至 4 Gbit/s 时, 平均时延从 4.2 ms 降至 2.0 ms。这表明, 提高端口速率能够显著降低传输时延, 提升网络性能。

实验结果表明, 节点机数量、端口速率、链路延迟、数据包大小和负载条件均显著影响 FC 网络的时延特性。具体而言, 随着节点机数量的增加, 平均时延显著上升; 提高端口速率能显著降低时延, 1、2、4 Gbit/s 端口速率下的平均时延分别为 4.2、3.1、2.0 ms; 链路延迟增加直接导致总时延增加, 从 0.1 ms 增加到 1 ms 时, 总时延从 3.5 ms 增至 8.5 ms; 数据包大小越大, 时延略有增加, 512、1 024、2 048 Byte 的数据包对应的时延分别为 3.0、3.5、4.0 ms; 负载越高, 时延越大, 消息成功到达率在 10 条/s 增加到 50 条/s 时, 时延从 2.8 ms 增至 5.6 ms。这些结果验证了本文方法的有效性和准确性, 为 FC 网络的设计和优化提供了重要依据。

表 2 不同端口速率对网络时延的影响

节点数量	端口速率/(Gbit·s ⁻¹)	链路延迟/ms	数据包/Byte	消息成功到达率/(条·s ⁻¹)	平均时延/ms
10	1	0.1	512	10	2.5
10	1	0.1	512	20	3.0
10	1	0.1	512	50	4.2
20	1	0.1	512	10	3.5
20	1	0.1	512	20	4.2
20	1	0.1	512	50	5.6
30	1	0.1	512	10	4.8
30	1	0.1	512	20	5.8
30	1	0.1	512	50	6.8
40	1	0.1	512	10	6.2
40	1	0.1	512	20	7.5
40	1	0.1	512	50	8.5
20	2	0.1	512	10	3.1
20	2	0.1	512	20	3.8
20	2	0.1	512	50	4.5
20	4	0.1	512	10	2.0
20	4	0.1	512	20	2.5
20	1	0.5	512	10	5.5

4 结语

本文提出了一种基于网络配置文件的 FC 网络时延特性模拟方法, 旨在应对现代航空电子系统中复杂 FC 网络的时延分析需求。通过自动化地收集和解析网络配置文件, 提取关键网络参数并构建时延模型, 实现了对 FC 网络的高效模拟和分析。实验结果验证了本文方法的有效性和准

确性, 为 FC 网络的设计和优化提供了重要的理论和实践依据。未来的研究可以进一步优化仿真模型, 考虑更多实际应用中的复杂因素, 如动态网络拓扑变化和不同类型的网络流量, 以进一步提升 FC 网络时延特性分析的精确度和适用性。

参考文献:

[1] 梁益丰, 许江宁, 吴苗, 等. 光纤时频同步技术的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 45-58.

[2] 郭俊成, 卢麟, 吴传信, 等. 基于时频共传的光纤链路时延测量方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(9): 66-72.

[3] 胡仕川. 新工科背景下计算机网络安全课程教学发展路径 [J]. 网络安全技术与应用, 2023(11): 93-95.

[4] 吴勇文. CPU/GPU 异构集群并行计算模型研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2012.

[5] 苗乾坤. 面向共享存储系统的计算模型及性能优化 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.

[6] 王蒙. 低延时高新鲜度数字传输的跨层设计研究 [D]. 北京: 清华大学, 2019.

[7] 吕恒伟, 李攀东, 张海剑, 等. 多小区 5G 认知无线网络能量有效资源优化 [J]. 信号处理, 2018, 34(12): 1440-1449.

[8] 陈丁, 许江宁, 李振中, 等. 光纤双向比对时间同步技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 57-65.

[9] 高源. 面向大数据处理的并行计算模型及性能优化 [J]. 计算机产品与流通, 2020(3): 105.

[10] 陈强, 刘彩霞, 李凌书. 基于改进式贪婪算法的 5G 网络切片动态资源调度策略 [J]. 网络与信息安全学报, 2018, 4(7): 60-68.

[11] 杨文哲, 杨宏雷, 赵环, 等. 光纤时频传递技术进展 [J]. 时间频率学报, 2019, 42(3): 214-223.

[12] 王志勤, 徐菲. 关于 5G 组网技术路线的分析与建议 [J]. 电信科学, 2019, 35(7): 3-7.

【作者简介】

王萌 (1994—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 航空机载网络 AFDX 的测试验证。

李雯 (1982—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 航空机载网络 AFDX、无线网络的研发、测试和仿真。

张潘岷 (1995—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 无损以太网络的测试验证。

(收稿日期: 2024-11-11)