

# 时间触发以太网的多域同步方法改进

李文江<sup>1</sup>, 刘 强<sup>2</sup>, 张 文<sup>3\*</sup>, 向 渝<sup>3</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所(通信网信息传输与分发技术重点实验室) 石家庄 050081;

2. 成都阳辰物联天下科技有限公司 成都 611731; 3. 电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

**【摘要】**时间触发以太网(TTE)是一种保证以太网实时性的解决方案。该文首先分析了在大规模确定性网络中引入同步域和同步优先级的原因,并针对TTE网络中3种常见的集群情况,设计了多同步域下多同步优先级的具体通信规则,满足更为复杂的TTE网络需求。通过仿真验证了同步域和同步优先级对确定性网络的影响。实验结果说明同步域和同步优先级能够提高TTE中时钟同步服务的精确性和安全性,在满足TTE网络实时性要求的前提下增加网络的灵活性。

**关键词** 确定性网络; 多同步域; 多同步优先级; 时间触发以太网

**中图分类号** TP393 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.04.005

## Research on Multi-Domain and Synchronization Priority of Time-Triggered Ethernet

LI Wen-jiang<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Wen<sup>3\*</sup>, and XIANG Yu<sup>3</sup>

(1. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation

(Science and Technology on Communication Networks Laboratory) Shijiazhuang 050081;

2. Chengdu Yangchen Wulian Tianxia Technology Co., Ltd. Chengdu 611731;

3. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** Time-triggered Ethernet (TTE) is a solution to guarantee the real-time performance of Ethernet. First of all, this paper analyzes the reasons for the introduction of synchronization domain and synchronization priority in large-scale deterministic networks. Then, for the three common clusters in the TTE network, the specific communication rules of PCF that includes synchronization domain and synchronization priority are designed. Finally, the proposed topology and communication rules are validated through simulation software. The experimental data analysis verifies the effect of synchronization domain and synchronization priority on the deterministic network. The experimental results show that the synchronization domain and synchronization priority can improve the accuracy and security of the clock synchronization service in the TTE. It is concluded that the synchronization domain and synchronization priority can increase the flexibility of the network under the premise of meeting the real-time requirements of the TTE network.

**Key words** deterministic network; multiple synchronization domains; multiple synchronization priorities; time-triggered Ethernet

TTE由于其强实时性和容错性的特点,被应用于航空电子系统<sup>[1]</sup>、汽车电子<sup>[2]</sup>、航天器<sup>[3]</sup>中,而目前大规模关键性系统应用体量较大,子功能模块众多,在工作时,各个子功能模块可能采用不同的时钟周期。如采用综合模块化航空电子系统(integrated modular avionics, IMA)架构的飞行器,飞行控制系统和雷达系统可能采用不同的时钟同步周期。在全局系统下,每经过一段时间后,各个独立的时钟可能需要统一同步校正,以调整时钟精度。所以在

大型系统中急需一套灵活的时钟同步方案。

强实时性网络中,抖动、时延指标尤为重要<sup>[4]</sup>。在大规模强实时性、确定性网络中,网络中的节点数量少,所以当执行时钟同步服务时不会出现很多的同步帧,此时网络的负载小,能够保证整体的服务质量。但是随着网络规模的扩大,网络中主机数量的增多,用于同步功能的帧在数量上将急剧增多,网络的负载越来越大,在时钟同步服务上将花费大量的时间,在强实时性需求的系统中,势必影响实

收稿日期: 2018-05-18; 修回日期: 2018-07-11

作者简介: 李文江(1976-),男,高级工程师,主要从事专用通信网络方面的研究。

通信作者: 张文, E-mail: 286988963@qq.com

时消息的时效性。

TTE中同步优先级、同步域能够将一个较大的确定性网络划分成多个小型确定性网络, 根据同步域、同步优先级的过滤原则, 有利于减少大规模网络中协议控制帧(protocol control frame, PCF)的网络拥塞, 提高PCF在网络中的传输速率, 从而提高网络的同步精度。同时同步域概念的引入能够扩大TTE网络的灵活性, 每个子网的同步时钟标准更为灵活, 能够满足大型系统各功能模块需要独立同步时钟的需求。在拥有同步域的情况下, 也便于子网络的加入, 增加了TTE网络的可扩展性。与此同时, 同步域也起到隔离作用, 保证不同时钟源的PCF不会相互影响, 保证了系统运行安全。

目前国内没有TTE多域和同步优先级相关的研究文献, 现阶段主要研究TTE的调度策略、构件实现和应用扩展。文献[5-6]是在OPNET网络仿真的基础上, 采用网络演算理论, 分析了TTE网络的性能。文献[7]分析TTE网络设计优化的几个角度。文献[8]指出了自动确定最小化成本的最优调度方式。

TTE最早是由TTTech公司实现, 国外关于TTE的研究<sup>[9-10]</sup>也主要集中于调度策略的优化上, 很少涉及多域和同步优先级的研究。

### 1 多域同步优先级概述

#### 1.1 TTE网络层次结构

TTE网络的层次分为4层, 从下至上分别为设备层、集群层、多集群层和网络层。在TTE网络中, 有3种类型的设备, 分别是同步客户(synchronization client, SC)、同步控制器(synchronization master, SM)和集中控制器(compression master, CM), 设备层即指SC、SM、CM。集群层是指拥有相同同步优先级和同步域的一系列设备组成的网络, 这些设备构成的网络结构也可以称为简单集群。而多集群层是指由多个同步域相同而同步优先级不同的集群组成的网络拓扑结构。网络层是指多个不同同步域、同步优先级的集群或者多集群组成的网络结构。

#### 1.2 集群

TTE定义了集群概念。集群中的设备(交换机和终端节点)有着相同的同步域和同步优先级。集群具有可组合的特点, 能够将多个集群进行组合构成一个大规模的TTE网络, 适用大规模需求的网络场景。若TTE网络有多个集群, 这些集群既可以独立地运行, 每个集群独立地进行时钟同步服务; 也能够以

某个最高同步优先级集群为标准, 低同步优先级的集群将同步到最高优先级集群的时钟, 多集群通常采用这种主从运行方式。

#### 1.2.1 简单集群

简单集群指仅由一个交换机和多个终端节点组成的TTE网络拓扑。图1展示了一个单通道简单集群。由于简单集群中仅有一个交换机, 所以交换机需要被配置为CM。简单集群中所有设备的同步域和同步优先级相同。

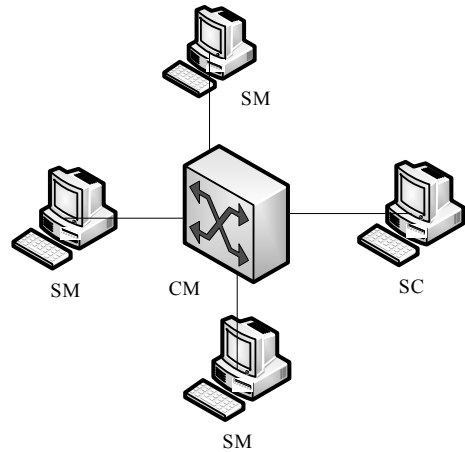


图1 简单集群

#### 1.2.2 级联集群

与简单集群不同, 级联集群中存在多个交换机, 所以级联集群一定是交换机多跳的拓扑结构。在级联集群中, 可以将一部分的交换机配置为CM, 剩下的配置为SC。图2展示了一个级联集群, 如果将多台交换机配置CM, 则称为多CM级联集群。

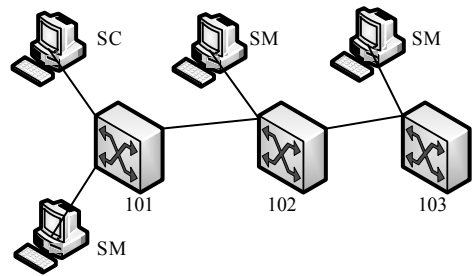


图2 级联集群

#### 1.2.3 多集群

图3为一个多集群拓扑图, 多集群中也存在多个交换机。与级联集群相比, 级联集群中的所有设备优先级相同, 而多集群中有着多个优先级, 图3中即有高低两个同步优先级, 但是所有设备的同步域相同。图3可以认为由两个同步优先级不同的简单集群组合拼接而成。

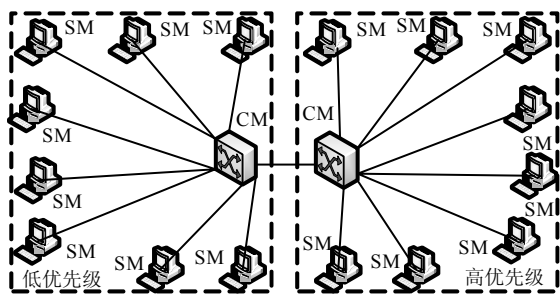


图3 多集群

### 1.3 同步域

同步域是一个整型正数，用来划分集群或多集群时钟同步服务的PCF。PCF中的同步域字段为8 bit，所以理论上TTE网络可以存在128个同步域。

### 1.4 同步优先级

PCF中同步优先级字段也为8 bit，理论上TTE网络中能存在128个不同优先级。图3展示了由两个简单集群构成的多集群，属于同一个集群的设备有着相同的同步优先级，左边的设备同步优先级为低，右边为高同步优先级设备。

在具有多同步优先级的网络中，低优先级的设备能够与最高优先级的设备同步，即采用高优先级的集中控制器洪泛的PCF，低同步优先级的设备可以配置成：1) 当接收到来自最高同步优先级集中控制器的PCF，立即采用该PCF进行时钟修正；2) 当接收到来自最高同步优先级集中控制器的PCF，通知网络中的主机，由主机决定是否使用该PCF，即是否同步到最高同步优先级集群。进行时钟同步服务时，终端节点只会使用具有目前正在同步的同步优先级的PCF，同步优先级不符合的PCF将会被丢弃。

## 2 同步域和同步优先级的设计

### 2.1 同步域和同步优先级的需求

在TTE中，通过同步域定义了“子网”，所有相同同步域组成的通信设备能够看成一个“子网”，其他“子网”的协议控制帧不会被本“子网”所使用。同步域不相符的PCF不会被处理，这样最大的好处就是减少了网络中PCF的数量，隔离不同系统的PCF，一定程度上加快了同步算法的完成时间。在时钟周期内可以将更多的时间用来发送TTM、RCM和BEM这3类消息，这一优点在小规模网络中可能难以体现，但是在拥有若干个子系统的大型网络中至关重要。

同步域同时也保证了系统的安全性，安全性是指其他同步域的PCF不会被本同步域使用，某个同

步域内的CM在进行同步服务时，只会采用本同步域内SM发出的PCF，不会被其他同步域内SM的PCF干扰，保证时钟计算的准确性。而SM和SC也不会使用非本同步域的CM发出的PCF，保证SM和SC时钟校正的正确性。

在没有划分同步域之前，由于TTE网络的容错能力有限，若多个设备出现故障，整个网络无法完成同步功能。而引入同步域概念后，若某一个域内发生多个节点故障，也只是影响本域内设备的同步，其他域能够正常完成时钟同步服务，在一定程度上又提高了TTE的容错能力，不会因为个别设备而影响全局网络的时钟。

由于每个同步域运行独立的同步时钟，所以网络的扩展能力得到增强。若需要在原有系统上增加子系统，只需要将子系统配置为一个新的域，无需修改原先的系统配置，即可完成同步功能。

同步优先级一方面反映了设备在网络中的重要程度，另一方面也能完成某个域内多个同步时钟功能。把某个同步域内的设备划分多个同步优先级，当接收PCF时，即可在同步域的基础上过滤同步优先级，完成一个域内运行多个同步时钟。这样更加灵活适应系统的多独立同步时钟需求，也解决了同步域内时钟同步的依赖关系。

### 2.2 节点属性设置

TTE中所有类型的设备都拥有同步优先级和同步域属性，在网络配置时，这两个属性值将作为静态参数提前写入设备的配置文件中。与此同时，配置文件中还有模式属性，同步构件有两种运行模式，分别是主从模式和独立模式。主从模式表明此设备可以采用最高优先级的PCF；独立模式则将始终采用原优先级时钟标准。

### 2.3 同步算法

同步算法主要分为了3个阶段，第一阶段为SM发送PCF；第二阶段是CM接收PCF执行集中算法，修正本地时钟，并产生新PCF；第三阶段为其余设备利用CM发送的新PCF完成时钟修正。下面将列出3种集群情况，同步算法的第一阶段一致，第二阶段和第三阶段略有差异。

以下同步算法仅描述消息正常接收处理过程，TTE具有容错能力协议，首先在网络中允许两个节点的故障，其次对于异常消息，TTE具有对异常处理的集群检测服务(clique detection)。在同步算法结束后，集群检测服务会检测同步完成的质量，是否有消息异常的情况，如果出现消息异常，则重新开

始同步算法, 保证同步服务的正确执行。

### 2.3.1 简单集群同步算法

本文结合UML时序图阐述算法流程<sup>[11]</sup>。以图1简单集群为例, 同步算法如下:

- 1) 在sm\_dispatch\_pit时刻, SM读取配置文件中的同步域和同步优先级, 将值写入PCF帧对应字段。
- 2) 在sm\_send\_pit时刻, SM成功将PCF帧发送到信道上。
- 3) 在cm\_receive\_pit时刻, CM接收到SM发送的PCF帧。如果PCF的同步域、同步优先级和CM的一致, 接收PCF, 进行时序保持算法, 否则丢弃该消息。
- 4) 在CM上的cm\_permanence\_pit时间点, 启动集中算法, 计算出cm\_compressed\_pit值和

membership\_new的和值。

- 5) 在cm\_clock\_corr\_pit时刻, CM进行时钟修正。
- 6) 经过延迟dispatch\_delay时间后, 在时刻cm\_dispatch\_pit准备产生一个新的PCF, 将CM的同步域和同步优先级写入新PCF帧中, 泛洪到SM和SC。
- 7) 在cm\_send\_pit时刻, 成功将新PCF帧发送到链路上。
- 8) 在smc\_receive\_pit时刻, 3个SM和SC接收到该PCF帧, 检查同步域和同步优先级是否与本设备一致, 一致表明属于同一个集群, 启动消息时序保持算法, 否则丢弃该PCF。
- 9) 在smc\_clock\_corr\_pit时刻, 完成时钟纠正。

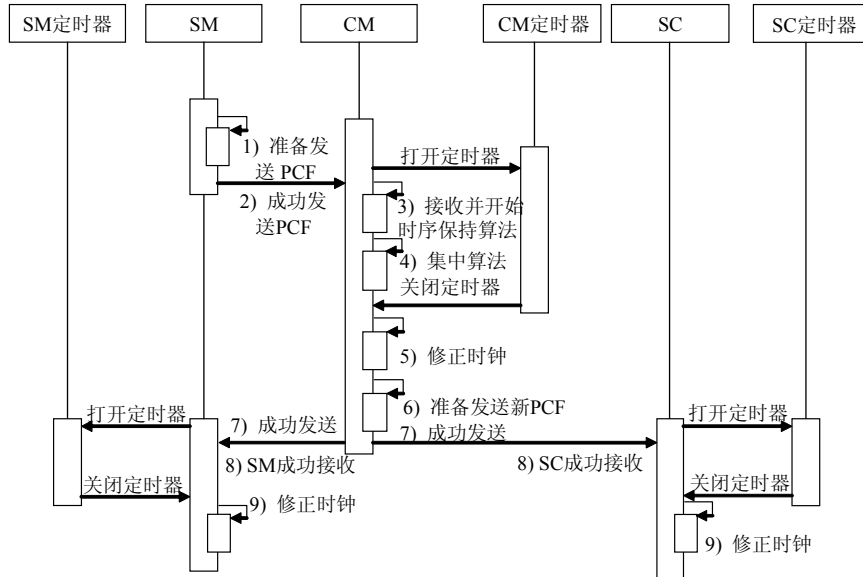


图4 简单集群时序图

在发送PCF时, 接收设备会打开一个定时器, 称为接收窗口, 接收窗口会在时钟修正前关闭。每个接收设备自身都具有一个接收窗口, 只有落在接收窗口之内的PCF才会被用于同步。

### 2.3.2 级联集群同步算法

结合图2阐述级联集群同步算法, 网络中共有3个交换机101、102、103, 为了简化同步流程, 将交换机101配置为CM, 102和103配置为SC。级联集群的同步算法与简单集群重合度高, 下面仅列出差异部分, 省去相同部分。

步骤3)中, 当交换机101、102、103接收到PCF。如果PCF的同步域和同步优先级与交换机一致, 接收此PCF; 如果交换机配置为SC, 立即加上时延并转发; 若为CM则执行时序保持。

步骤8)在smc\_receive\_pit时刻, SM和SC接收到新的PCF, 若优先级和同步域一致, 则接收PCF并执行时序保持, 如果当前设备为一台SC交换机, 同时将此PCF加上时延并转发。

### 2.3.3 多集群同步算法

以图3拓扑结构为例, 阐述多集群的同步算法, 拓扑中左边8个SM和CM构成低优先级集群, 右边8个SM和CM构成高优先级集群。图5为主从运行模式下的时序图, 多同步优先级的同步算法如下, 仅列出差异部分, 省去相同部分。

步骤3)中, 在cm\_receive\_pit时刻, CM接收到PCF, 如果PCF的同步域小于本设备同步域则丢弃该PCF; 如果CM采用独立模式, 接收并执行时序保持算法; 如果CM采用主从模式, 则等待最高优先级

CM的PCF。

步骤6)中, 经过延迟`dispatch_delay`时间后, 在时刻`cm_dispatch_pit`准备产生一个新的PCF, 将CM的同步域和同步优先级写入新PCF帧中, 泛洪到SM、SC和CM。

步骤8)中, 在`smc_receive_pit`, SM和低优先级CM接收到CM发送的新PCF。首先判断PCF的同步

域, 若同步域不一致, 则丢弃该PCF。当配置为主从模式的CM交换机接收到PCF, 如果是最高优先级的PCF, 则进行时序保持算法并加上时延转发。如果是SM节点接收, 若PCF的优先级一致或者为最高优先级, 则进行时序保持算法。若配置为独立运行模式的CM接收到其他CM发送的PCF, 则会由于同步优先级不一致而丢弃。

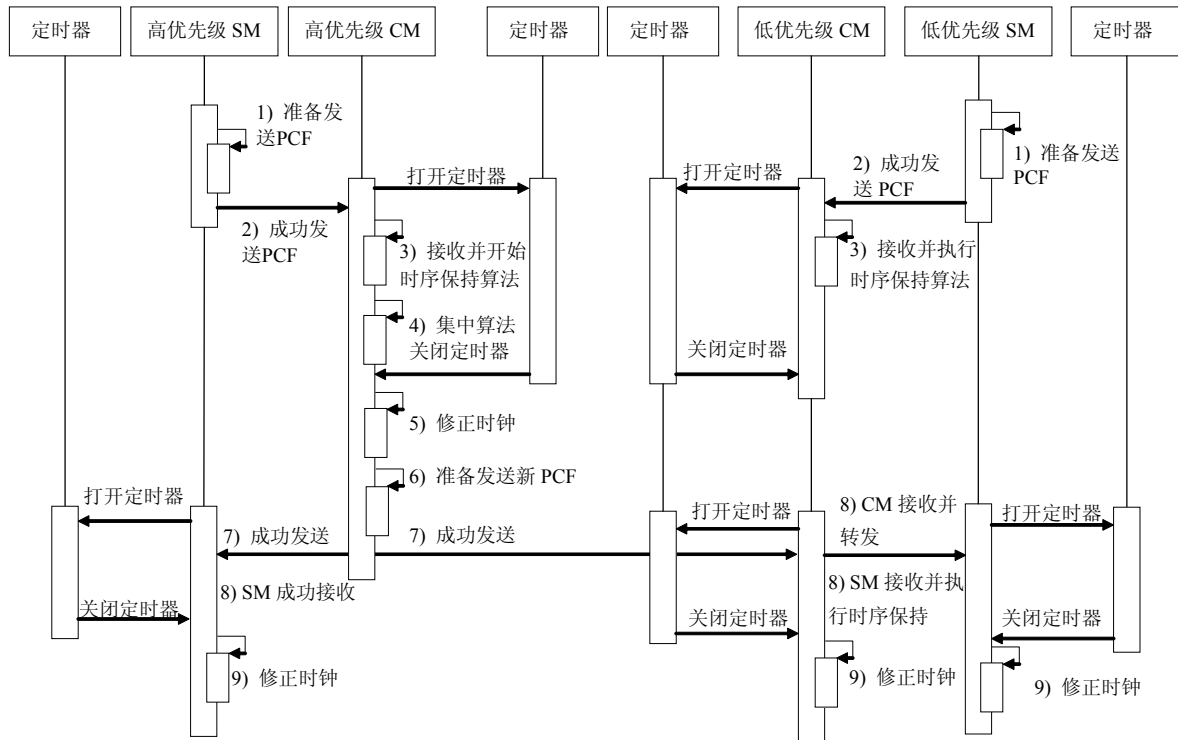


图5 多集群下主从模式同步时序图

### 2.3.4 同步算法时间复杂度分析

时钟同步算法由时序保持算法和集中算法组成。时序保持算法分为两步, 第一步计算时序时延, 第二步根据第一步结果计算`permanence_pit`, 时间复杂度与输入无关, 所以时间复杂度为 $O(1)$ 。集中算法需要处理收集的所有PCF, PCF的数量又与SM数量有关, 若设SM的数量为 $n$ , 则集中算法的时间复杂度为 $O(n)$ 。

在多同步域下,  $m$ 为同步域的个数,  $n$ 为所有同步域中SM的最大数量, 由于SM和SC不执行集中算法, 所以SM、SC的同步时间复杂度为 $O(m)$ 。在独立模式下, CM的同步时间复杂度为 $O(n)$ , 在主从模式下, CM的同步时间复杂度为 $O(mn)$ 。

## 3 多域同步优先级的网络确定性分析

为了验证含有同步域和同步优先级的时钟同步算法正确性, 针对图1~图3每种拓扑结构, 在

OPNET做了仿真验证, 分析了时钟同步精度和PCF时延, 其中时钟同步精度指所有设备本地时钟的最大值与最小值的差值。

### 3.1 简单集群和级联集群网络分析

实验1的拓扑结构如图1所示, 网络中有3个SM、1个SC和1个CM。时钟同步周期为25 ms, 所有设备的同步域和同步优先级设置为1, 采用独立运行模式, 仿真时间设置为0.25 s。采用1 000 Mb速率的链路模型。

实验2的拓扑结构如图2所示, 其中交换机101配置为CM, 交换机102和交换机103配置为SC, 所有设备的同步优先级和同步域设置为1, 所有设备模式设置为独立运行。时钟同步周期也为25 ms, 仿真时间0.25 s。网络中采用1 000 Mb链路模型。

经实验验证, 所有节点正常完成时钟同步。图6为时钟同步精度结果图。在仿真时间内共完成9次时钟同步服务。从图中看出, 随着网络规模扩大, 时

钟同步精度减小, 本地时钟偏差扩大(本地时钟的最大值与最小值的差值), 虽然实验2中2~6周期的本地时钟偏差优于实验1, 但是本地时钟偏差的整体浮动较大, 两组实验精度都维持在纳秒级别, 满足TTE的指标。

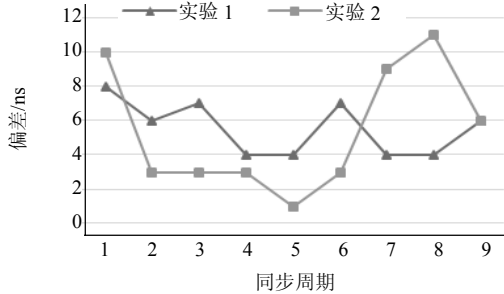


图6 时钟同步精度

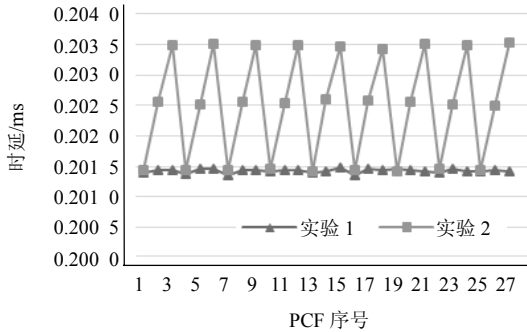


图7 PCF时延结果

图7为PCF的时延分析图。PCF的时延在合理范围之内。从实验2的PCF时延分析, 27个数据有规律地分成了9组, 分别对应每个同步周期内的结果, 结果数据符合网络结构, 对应网络中一跳、两跳、三跳的PCF, 其中一跳的时延值与实验1中PCF时延值接近。

### 3.2 多集群网络分析

实验3的拓扑图采用图3结构, 网络中有两个CM, 每个CM连接8个终端设备, 所有的设备的同步域设置为1, 即都在一个同步域内同步。拓扑中左边的9个网络设备组成的集群同步优先级被配置为1(高同步优先级), 右侧余下的设备组成的集群被配置为2(低同步优先级)。两个优先级的同步周期都设置为25 ms, 即每经过25 ms所有节点运行一次时钟同步服务程序。网络中采用1 000 Mb链路模型。

为了验证多优先级集群中运行模式的影响, 实验3设计了一组对比实验, 两组实验都采用图3的拓扑结构, 第1组为: 低优先级集群同步到高优先级集群, 即低优先级集群采用主从运行模式。第2组为:

低优先级集群不同步到高优先级集群, 低优先级集群采用独立运行模式。

图8为PCF的端到端时延。当低优先级集群配置为同步到高优先级集群时, 发现PCF的端到端时延明显增大, 因为在该同步策略下, 图中原本的单跳拓扑结构传输变成了两跳, 造成了时延增大。

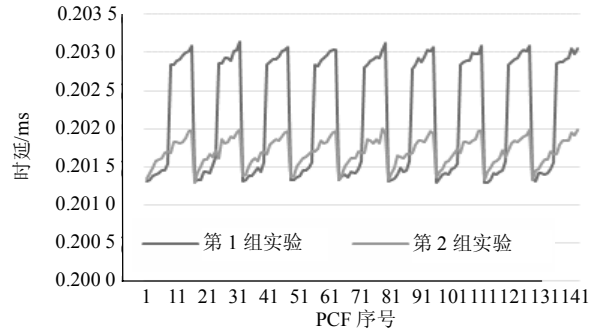


图8 PCF时延分析

对两组实验网络中的PCF接收情况进行分析, 通过在设备上配置同步优先级和同步域, TTE设备成功丢弃不符合要求的PCF, 保证了时钟同步服务的安全性。

图9描述了多集群时钟同步精度。从图中可以看出, 独立运行时, 每个集群内的时钟精度偏差都要小于低优先级集群同步到高优先级集群的情况。两组实验的时间偏差值都在预期范围内, 并且时间同步精度越高偏差越小。

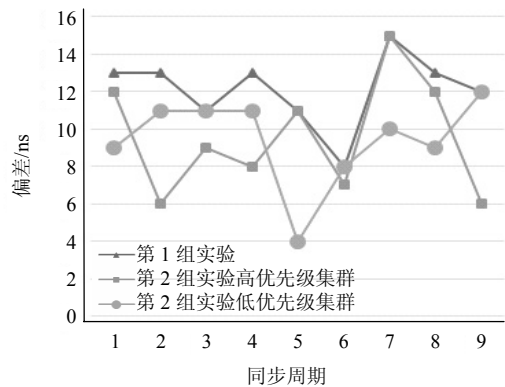


图9 多集群时钟同步精度

### 3.3 多同步域网络分析

本文针对多同步域的网络情况, 做了一组多同步域的验证实验4。实验4采用图3拓扑结构, 将原先的低优先级集群设备同步域设置为1, 同步优先级设置为1(高); 原先的高优先级集群设备同步域设置为2, 同步优先级设置为1(高)。同步周期也为25 ms, 采用1 000 Mb速率的链路模型。所有设备采用独立运行模式。

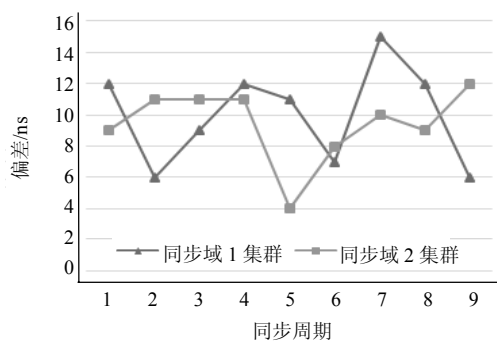


图10 多同步域时钟同步精度

通过对实验结果分析,多同步域下的时延和时钟偏差值如图10和图11所示。每个周期内的同步时钟同步精度都在20 ns以下,PCF的时延在201 us范围浮动。由于时钟同步服务时,首先会检查PCF中的同步域字段,不是一个同步域内的PCF不会被用于同步。通过分析CM上接收的PCF中同步域字段,只有相同同步域的PCF才被保留,实际接收的情况与算法一致,验证了同步算法的正确性。

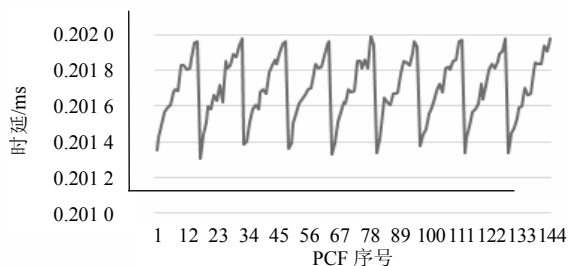


图11 多同步域PCF时延

## 4 结束语

在时钟同步服务中引入同步域和同步优先级概念能够增加TTE网络的灵活性,在大规模确定性网络中可以将每个子功能模块划分为一个同步域,运行独立的同步时钟,也保证了每个子模块时钟源的安全性。TTE网络采用了全局时钟同步技术,减少时钟漂移对网络实时性的影响。通过配置集群中设备的同步域和同步优先级属性,减少了网络规模扩大对同步精度的影响,同时也做到了PCF安全隔离。通过4组实验说明本文提出的同步规则的正确性,关键参数都能达到TTE的指标要求,因此多同步域和多同步优先级是大规模确定性网络时钟同步服务的一种可行的解决方案。

本文得到通信网信息传输与分发技术重点实验室开放课题(KX162600026)资助,在此表示感谢!

## 参考文献

- [1] SUEN J F, KEGLEY R B, PRESTON J D. Affordable avionic networks with Gigabit Ethernet assessing the suitability of commercial components for airborne use[C]// 2013 Proceedings of IEEE SoutheastCon.[S.l.]: IEEE, 2013: 1-6.
- [2] STEINBACH T, LIM H T, KORF F, et al. Tomorrow's in-car interconnect? A competitive evaluation of IEEE 802.1 AVB and time-triggered ethernet (AS6802)[C]// Vehicular Technology Conference. Quebec City: IEEE, 2012: 1-5.
- [3] 程博文, 刘伟伟, 何熊文, 等. 猎户座飞船电子系统设计特点分析与启示[J]. 航天器工程, 2016, 25(4): 102-107.
- [4] CHENG Bo-wen, LIU Wei-wei, HE Xiong-wei, et al. Analysis and inspiration of electronic system design of orion spaceship[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(4): 102-107.
- [5] HUYNH M, GOOSE S, MOHAPATRA P. Resilience technologies in Ethernet[J]. Computer Networks, 2010, 54(1): 57-78.
- [6] 向渝, 羊刚, 王伟, 等. 基于网络演算的确定性以太网性能评估[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(11): 59-63.
- [7] XIANG Yu, YANG Gang, WANG Wei, et al. Performance evaluation of deterministic Ethernet based on network calculus[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44 (11): 59-63.
- [8] XIANG Y, WANG W, ZHANG X, et al. Performance research on time-triggered Ethernet based on network calculus[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2014, 2014(1): 12.
- [9] STEINER W, STEINER W. Design optimization of TTEthernet-based distributed real-time systems[M]. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2015.
- [10] LAUER M, MULLINS J, YEDDES M. Cost optimization strategy for iterative integration of multi-critical functions in ima and ttethernet architecture[C]//2013 IEEE 37th Annual Computer Software and Applications Conference Workshops. [S.l.]: IEEE, 2013: 139-144.
- [11] TAMAS-SELICEAN D, POP P, STEINER W. Synthesis of communication schedules for TTE thernet-based mixed-criticality systems[C]//8th IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/software Codesign and System Synthesis. Finland: ACM, 2012: 473-482.
- [12] ZHANG L, GOSWAMI D, SCHNEIDER R, et al. Task- and network-level schedule cosynthesis of Ethernet-based time-triggered systems[C]//Asia and South Pacific Design Automation Conference. Singapore: IEEE, 2014: 119-124.
- [13] SONG D, ZENG X X, DING L N, et al. The modeling and the simulation implementation of AFDX network system[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(2): 76-80.

编辑 税红