

## 时间触发以太网加速航电互联

董进武

(中国人民解放军海军驻阎良地区航空军事代表室,西安 710089)

**摘要:** 时间触发以太网(TTE)是具有高精度分布式时钟同步机制、时间和事件触发功能以及数据高可靠性的网络。根据航空电子综合化互联发展需求,分别分析了TTE网络的可扩展性和实时性,给出了仿真TTE网络的方法,验证了时间触发以太网实时特性,仿真表明TTE适用于分布式航电互连网络。

**关键词:** 时间触发以太网;全双工交换式以太网;分布式综合模块架构

**中图分类号:** V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)02-0074-05

## Time Triggered Ethernet Accelerating Avionics Interconnection

DONG Jin-wu

(Aviation Military Representative Office of PLA Navy in Yanliang District, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Time Triggered Ethernet (TTE) is a kind of network that has high accuracy distributed clock synchronization mechanism, time/event triggering function and high data reliability. According to the development requirements of the aviation electronic integrated interconnection, the scalability and real-time characteristics of TTE network are analyzed. A method for simulating TTE network is presented, and the real-time characteristic of the time triggered Ethernet is verified. The simulation shows that TTE is suitable for distributed avionics interconnection network.

**Key words:** Time Triggered Ethernet (TTE); Avionics Full-Duplex Switched Ethernet (AFDX); Distributed Integrated Modular Architecture (DIMA)

### 0 引言

时间触发以太网(Time Triggered Ethernet, TTE)<sup>[1-2]</sup>在交换式网络环境下实现了精确到亚微秒量级的分布式时钟同步,为时间触发通信的调度提供了必要条件。经过产业界的推动,TTE网络互连技术不仅能够在此有航空电子全双工交换式以太网(AFDX)的基础上进行扩展,以支持混合关键性的流量,而且有望将现有航空电子体系结构提升为分布式综合模块化(DIMA)结构<sup>[3]</sup>。目前,TTE已经应用于多种航天航空产品,如NASA的Orion多用途载人飞船、波音的A380和西科斯基的直升机。

### 1 TTE网络协议

SAE AS6802标准说明,它的使用范围仅规定在以

太网协议基础上用于时间触发通信和分区管理的故障冗余同步协议,具体而言,它并不重新定义IEEE802.3标准以太网或AFDX等专用以太网,而仅关注于分布式时钟同步协议的定义,能够为网络设备提供“分布式故障容忍同步、具有鲁棒性的时分多路复用(TDM)式的带宽划分,以及带有固定时延和微秒级时延抖动的同步通信”。

SAE AS6802<sup>[4]</sup>标准对于分布式同步协议的规定特别关注于系统的完整性,分布式时钟同步依赖于透明时钟机制和具有容错能力的分布式算法,系统的启动和重启严格遵循定义的协议状态机,并且根据应用的需要分别给出高完整性和标准完整性的配置说明,目的在于使TTE网络可以应用于时间关键性、安全关键性和任务关键性的嵌入式系统互连。

在SAE AS6802标准的文档中,除了对TTE网络的范围和引用文档进行说明之外,主要集中于TEE的同步协议控制机制和工作机理的描述。其中与TTE网络协议有关的功能主要有同步协议控制、重要的消

息固化及压缩、时钟同步服务等；与完整性有关的工作机理主要有结团检测、启动和重启、系统与系统同步等。文档还对同步参数进行概述，并在附录中给出故障封闭，以及 TTE 网络在标准以太网和 AFDX 网络上实现的指南<sup>[5]</sup>。

对于全局时钟同步，TTE 网络“同步拓扑”的概况如表 1 所示。最底层定义为设备级别，包括同步主控制器(SM)、同步客户端(SC)和压缩控制器(CM)；集群级别将具有相同同步优先级和同步域的设备组织为一组，并成为一集群；多集群级别将具有不同优先级和相同同步域的多个集群组织为一组；在最上层的网络级别将所有的具有不同同步优先级和不同同步域的集群组织在一起。

表 1 TTE 的同步拓扑

Table 1 TTE synchronization topologies

网络级别	网络组成及同步优先级
多集群级别	一个同步域 多个同步优先级
集群级别	一个同步域 一个同步优先级
设备级别	同步主控制器 (SM) 压缩控制器 (CM) 同步客户端 (SC)

TTE 提供了 1 种协议控制流量和 3 种不同的流量等级：协议控制帧(PCF)流量、时间触发(TT)流量、速率约束(Rate-Constrained, RC)和“尽力传”(Best-Effort, BE)流量，所以，TTE 网络能够在一个物理网络上支持具有不同实时性和安全性需求应用之间的通信。

PCF 帧是 64 Byte 的以太网帧，其类型字段被设为 0x891d，其以太网载荷中包含“透明时钟域”，用于实现 SM、CM 和 SC 之间的分布式时钟同步算法。

TT 消息用于具有严格时延、时延抖动和确定性需求的应用。TT 消息在网络上以预先定义的时刻发送，虽然低于 PCF 的优先级，但优于其他流量等级的优先级。RC 消息实现与 ARINC664 part 7 标准<sup>[6]</sup>兼容的通信模式，被用于那些与严格的时间触发应用相比确定性和实时性弱一些的应用。RC 消息保证对于每个应用具有预定义的带宽，而且延迟和时间偏离量具有规定的界限。与 TT 消息不同，RC 消息的发送是事件触发的，在设计中需要采用最坏情况分析评价其延迟和时延抖动上限，以核对是否满足设计要求。BE 消息实现的是传统的以太网通信方法，在没有 TT 或 RC 形式的关键性流量的情况下，传输没有实时性要求的信息。

TTE 网络的分布式时钟同步分为两个步骤：SM 向其相连的 CM 发送时钟同步控制帧 PCF，CM 向其相连的 SM 和 CM 发送压缩后的时钟同步数据帧。如图 1 所示，在每个综合循环中，多个 SM 在本地时钟到达预设

时间点向 CM 发送 PCF 帧，由于存在时钟偏移和传输延迟，各个 SM 发送 PCF 的真实时间会有差别。CM 收到 PCF 帧的时序和发送时序不一致，需要执行固化功能，通过“透明时钟”携带的传输延迟信息还原 SM 派发 PCF 帧的真实时序和绝对时间间隔。随后，CM 对固化后的时刻执行压缩功能，对于还原的多个 SM 的发送时刻取平均，作为时钟更正的基准值。CM 一方面根据基准值对自身时钟进行修正，另一方面根据基准值进行一段预设的延迟，再向 SM 和 SC 派发压缩后的 PCF 帧。SM/SC 也执行固化功能，还原 PCF 帧的实际派发时刻，并将此实际时刻与期望时刻对比，算出本地时钟和基准值的差值，修正本地时钟。

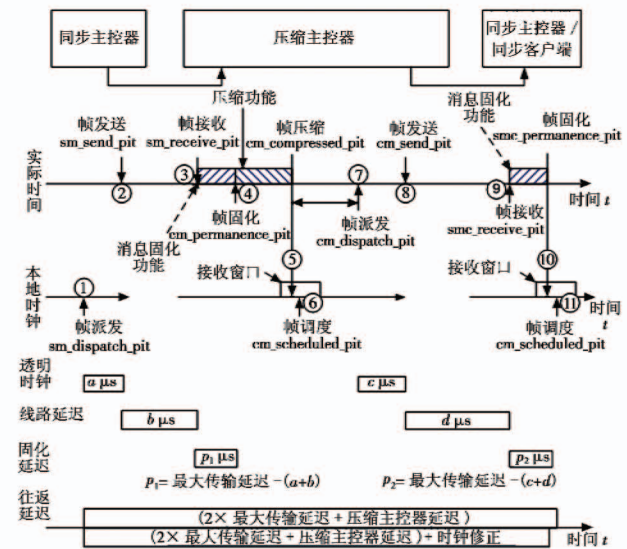


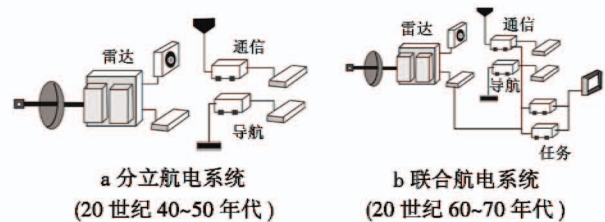
图 1 协议控制流时序

Fig. 1 Time sequence of the protocol control flow

TTE 网络提供同步优先级和同步域机制。在一个 TTE 网络中，两个属于不同同步域的组件不相互同步它们的时钟，它们之间的通信只有通过非时间触发流量，即 RC 或 BE 流量实现。当某个同步域中的 TT 消息在跨越同步域的时候，被作为非 TT 消息转发。

## 2 航空电子综合化互连需求

航空电子系统经历了分立式、联合式、综合式和先进综合式 4 个发展阶段<sup>[5-6]</sup>，其演变历程如图 2 所示，各个阶段均具有不同体系结构的综合化互连技术。



a 分立航电系统 (20 世纪 40~50 年代)

b 联合航电系统 (20 世纪 60~70 年代)

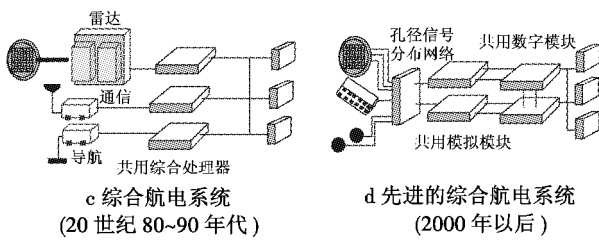


图 2 历史上的航空电子综合化体系结构

Fig. 2 An historical review on integrated avionics system architectures

伴随着时间触发网络互连技术的出现,在先进综合式的基础上可以实现先进的分布式综合模块化航空电子(DIMA)系统,其具有灵活、可重用的特点和良好的互操作能力<sup>[7]</sup>。为了更好地适应各种任务的新需求,航电信息系统集成的总体方向向着高实时、高带宽、分布式、综合化、模块化、小型化、智能化及即插即用的技术趋势发展。针对这些需求,TTE网络互连技术具有如下优势。

1) 可扩展性和混合关键性保证。物理节点数量由交换机端口数量决定,易于扩展;虚拟链路(VL)支持不同关键性等级的流量,满足硬实时、软实时与非实时系统、低速与高速系统同时存在的需要,保护既有投资,实现技术无缝升级。

2) 高带宽和时间确定性保证。支持微秒级别的实时控制系统;支持 100 Mbit/s 和 1 Gbit/s 通信速率,物理层采用双绞线或光纤,10 Gbit/s 通信速率的 TTE 技术正在研发。

下面将分别对于 TTE 网络的可扩展性和时间确定性进行讨论。

### 3 TTE 网络的可扩展设计

#### 3.1 物理拓扑的可扩展性

TTE 网络与大飞机中采用的飞机数据网络(ADN)的物理层兼容。兼容的物理层包括:

- 1) 电介质 STP, 100Base-TX 标准, 码速率 100 Mbit/s;
- 2) 光介质多模光纤, 100Base-FX 标准, 码速率 100 Mbit/s, 线路码型采用 8 bit/10 bit 编码;
- 3) 光介质多模光纤, 1000Base-SX 标准, 码速率 1000 Mbit/s, 线路码型采用 8 bit/10 bit 编码, 但分为中心波长 850 nm 和 1300 nm 两种物理层收发器。

上述标准还约定:对于物理层中的介质有关接口(MDI)子层,不采用商用以太网中的 MDI-X 技术;对于 MDI 子层,不采用商用以太网中的信号自协商技术,即不允许收发器同时支持多种协议并自动切换。

#### 3.2 实时通信的可扩展性

TTE 网络采用全双工互连,屏蔽了商用以太网的半

双工协议,更利于进行多级交换级联。除此之外,TTE 网络与商用以太网在链路层最大的不同在于:1) TTE 网络使用静态路由,不受商用网络树状网络拓扑的约束;2) TTE 网络使用静态寻址,不采用自学习的 MAC 层寻址协议。

商用以太网采用最小生成树协议避免出现环形的网络路径,而 TTE 网络完全禁止这种 STP 协商,可以根据流量均衡原则配置路径。在静态路由的支持下,TTE 网络的交换机也采用用户自定义配置的静态寻址方式,屏蔽了商用以太网交换机的自学习功能,避免了链路层建立寻址表的耗时,杜绝了相应的信令帧对实时通信的干扰。

在实用中 TT 流量和 RC 流量都可以被作为 VL 管理,在 MAC 地址中嵌入 16 位的 VL ID。

#### 3.3 中心守卫机制的可扩展性

为了使既有的 RC 流量和 TT 流量共存,交换机要具备更强的中心守卫功能,即:

1) RC 流量的指令/监视对(COM/MON pair),防止 RC 流量被 TT 流量干扰,或干扰 TT 流量发生不一致故障;

2) RC 流量的流量管制机制,防止某个节点主机故障时发出大量无意义的 RC 流量,导致网络瘫痪。

以高完整性为设计要求的组件 COM/MON 对的结构如图 3 所示,以应对假设网络组件发生不一致、遗漏失效的情况,即核心 COM/MON 的假设是:COM 和 MON 独立失效、MON 能够截断 COM 产生的故障消息;当 listen\_OUT 和 OUT 中消息不同时,COM 不能产生一个有效消息;MON 自身不能通过将 listen\_OUT 反接到 OUTPUT,以及 MON 自身不能随意截断信号产生一条故障消息。

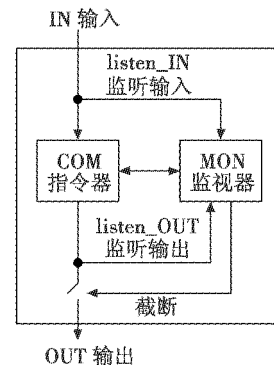


图 3 通过 COM/MON 对构成高完整性设计

Fig. 3 High-integrity design by the usage of COM/MON pair

同时,对于 RC 流量采用基于令牌漏桶算法的流量管制机制,其基本思想是:当数据包的流量到达时,积累的信用量开始减少。若包流的速率超过信用量的充值速率,会出现信用量不足的现象,包长超过信用量的包被丢弃,起到了避免某条 VL 失控发出过多无意

义数据包占据带宽阻塞其他正常流量的作用。最坏情况下的流量管制运行情况如图 4 所示。

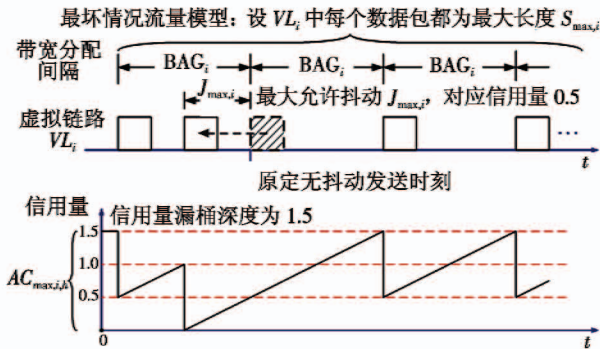


图 4 最坏情况下的 RC 流量管制

Fig. 4 Traffic policing for RC flows in the worst case

### 3.4 时钟同步的可扩展性

PCF 帧是 TTE 网络中达成分布式时钟同步的信令，其中的位域“pcf\_membership\_new”是一个标识同步成员的 32 位比特矢量。必须注意的是，这里提到的“新成员”仅指同步主控器，而不包含同步客户端；因此，一个同步域最多有 32 个 SM 参与分布式时钟的校准，但理论上 SC 的数目不受限制。这样，使得一个同步域 的节点容量满足网络容量可扩展的需求。

在实际应用中，在一个同步域中选取时钟精度比较高的 4~5 个节点，一般即可满足 1 μs 精度的分布式时钟同步的要求。过多设置参与同步的 SM，不仅会提高设备造价，而且引起比较复杂的结团检测。SC 的协议状态机非常简单，易于实现且对嵌入式设备处理的开销要求极小。

TTE 网络允许在一个时钟域中使用多个互为备份的 CM，这样，SM 可以在一个 IC 之内收到多个 CM 返回的 PCF 帧，SM 将收到的这些帧固化后平均（或取中位数），在多个 CM 都正常工作时可以提高同步精度，而在多个 CM 中有某个 CM 发生故障的情况下可以根据拜占庭算法进行容错。

## 4 TTE 网络的时间确定性保证

TTE 网络充分发挥了交换式可扩展的灵活性，然而拓扑结构和路由的变化必然导致重新设计和配置 TT 流量的时刻调度表。对于包含复杂周期关系的通信任务集（通信任务的周期不呈 2 的幂次的调和整数倍关系，甚至多个任务之间的周期互质），生成时刻调度表是 NP 问题，目前具有求解该问题的形式化求解器，进行离线求解。对于大部分的任务集和非病态的约束关系，还是能够在可容忍的时间内得到可行解。

由于需要 TT 流量与 RC 流量共存，所以获得调度表后的 TT 流量被所谓“后验调度变换”过程疏解开，分散

在整个 CC 周期，形成多孔调度。每个 CC 周期的时隙非常紧密，而 RC 流量可以利用 TT 消息之间的孔隙传输。

例如，TTTech 公司自身的设计工具 TT-Plan 采用内嵌 SMT 问题（计算机学 SAT 问题的一个子集）求解器的方法进行调度表生成，降低了系统集成者的工作强度。当发现可行解后，TT-Plan 工具以图形化的方式展示每条 TT 虚拟链路经过各条物理链路的时序关系，如图 5 所示。

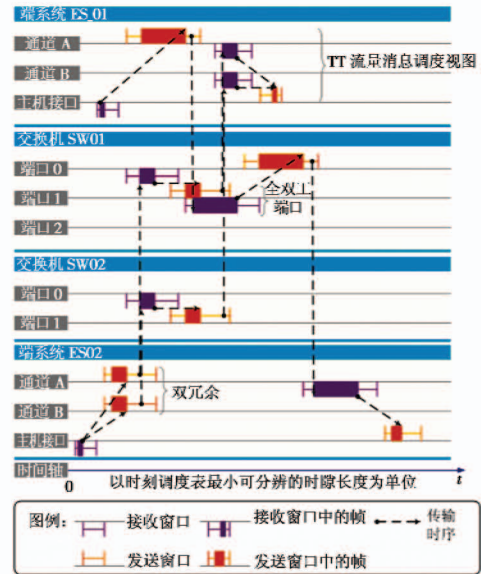


图 5 时间调度表测试用例示意图

Fig. 5 A demo of test case for scheduling time-table

## 5 案例仿真研究

可以采用 OPNET 开放式仿真平台开发 TTE 网络的仿真模型，对 TTE 网络的端系统（ES）和交换机建模中最关键的部分是可以处理多种实时流量的端口模型，在 OPNET 的模块层次中建立端口模型，如图 6 所示，分别对于不同级别流量采用不同的调度队列和时间控制策略。

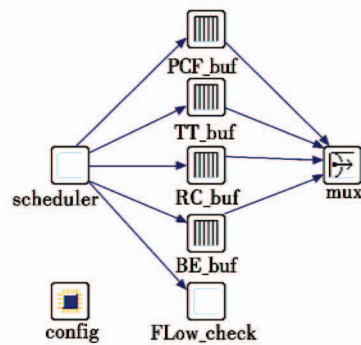


图 6 TTE 网络端口的 OPNET 建模

Fig. 6 The OPNET model of the port in TTE networks

实验案例是包含两个机群的 TTE 交换式级联网络，如图 7 所示，每个机群包含一台交换机和 3 台 ES，设压缩控制器（CM）分别安置在交换机 SW01 上，其他

的 ES 通过直接接入或交换机 SW02 转发 PCF, 分别充当 SM 执行分布式时钟同步协议。

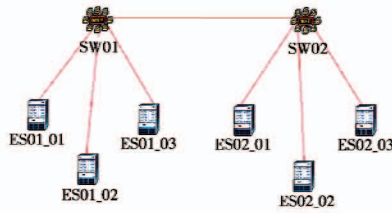


图7 仿真案例的场景图

Fig.7 The scenario plot for a simulation case

TTE 业务流量配置见表2。

表2 TTE 业务流量配置表

Table 2 Configuration table for TTEthernet serving traffic flows

流量类型	VL ID	源 ES	目的 ES	周期/ms	带宽分配间隔/ms	帧长/Byte	优先级
PCF	无	所有 ES	SW01	5	无	64	最高
TT	VL1	ES01_01	ES01_02	5	无	128	高
	VL2	ES01_02	ES01_03	10	无	128	高
	VL3	ES01_03	ES02_01, ES01_01	10	无	1518	高
	VL4	ES02_01	ES02_02	10	无	128	高
	VL5	ES02_02	ES02_03	10	无	128	高
	VL6	ES02_03	ES01_01, ES02_01	10	无	1518	高
RC	VL11	ES01_01	ES02_03	10	8	64	高
	VL12	ES01_02	ES02_02	20	16	128	高
	VL13	ES01_03	ES02_01	20	16	1518	高
	VL14	ES02_01	ES01_03	10	8	64	高
	VL15	ES02_02	ES01_02	20	16	128	高
	VL16	ES02_03	ES01_01	20	16	1518	高
BE	V21 ~ V32	作为背景流量仿真。每个 ES 分别向其他 ES 节点发送平均码速率为 1 Mbit/s 的随机长度的 UDP 帧(长度从 64 Byte 到 1518 Byte), 帧间发送间隔大于 32 ms					低

仿真案例中 TT 流量和 RC 流量的端到端延迟比较如图8所示。

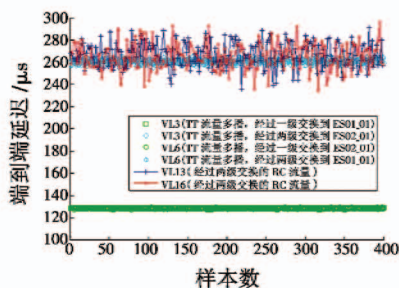


图8 仿真案例中的 TT 流量和 RC 流量的端到端延迟比较

Fig.8 The comparison of end-to-end delays between TT and RC flows in the simulation case

## 6 结束语

对于航空电子综合化互连应用, TTE 网络能够满足其可扩展性和时间确定性需求, 必将加速航空电子系统互联的发展。仿真表明, 不同关键等级的流量可以在综合化网络中共存, 并分别保证其实时性能要求。时间触发通信任务根据时间调度表确定发送、转发和接收时刻, 具有严格的时间确定性, 其时延抖动远远小于事件触发的速率约束流量, 可供重要的安全关键性通信任务使用。

## 参考文献

- [1] STEINER W. TTEthernet specification [Z]. Austria, TTTech Computertechnik AG, 2008.
- [2] JAKOVLJEVIC M. Deterministic Ethernet; SAE AS6802 "Time-Triggered Ethernet" [EB/OL]. (2013-08-19) [2015-09-15]. <http://www.sae.org/servlets/works/committeeHome.do?comtID=TEAAS2D>.
- [3] WOLFIG R. 综合化模块化航空电子系统的分布式平台: 对未来航空电子系统及其认证需求的见解 [M]. 牛文生, 译. 北京: 航空工业出版社, 2015. (WOLFIG R. A distributed platform for integrated modular avionics—insights on future avionics systems and their certification requirements [M]. Translated by NIU W S. Beijing: Aviation Industry Press, 2015.)
- [4] SAE Aerospace. SAE AS6802 Time-triggered Ethernet [S]. SAE International, 2011.
- [5] 熊华钢, 周贵荣, 李峭. 机载总线网络及其发展 [J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1135-1144. (XIONG H G, ZHOU G R, LI Q. A survey on avionics bus and network interconnections and their progress [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1135-1144.)
- [6] 熊华钢, 王中华. 先进航空电子综合技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. (XIONG H G, WANG Z H. Advanced avionics integration techniques [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [7] WOLFIG R, JAKOVLJEVIC M. Distributed IMA and DO-297: architectural, communication and certification attributes [C]//The 27th Digital Avionics Systems Conference, 2008: 26-30.