

时间触发以太网（TTE）在航天中的应用

参考：

AS6802规范：SAE AS6802. Time-Triggered Ethernet [S]. SAE Aerospace Standard, 2011.11.

TTEthernet, a Promising Candidate for Ariane 6. Data Systems in Aerospace 2014 运载火箭内部网络

Overview of TTE Applications and Development at NASA/JSC

主要关键词：launch vehicle、载人航天器内部网络、 avionics system 、 spacecraft

相关组织与计划：[European Space Agency \(ESA\)](#)、[NASA](#)美国国家航空航天局、[TTTech](#)、A&S (Avionics and Software Project) 项目：由NASA下高级探索系统（AES）建立的，将实现更灵活的IMA

典型应用

1. A380 客舱压力控制系统
2. Boeing787 电源及环境控制系统;
3. NASA“猎户座”飞行器;
4. F-16 数字发动机控制系统;
5. 欧航局Ariane 6 大型火箭

应用背景

随着中国航天和空间技术的快速发展，航天器数据通信系统逐渐从相对单一的数管系统发展为连接多设备、多平台甚至多飞行器组合体的复杂数据交换系统，具有更高的通信要求和新的特征

1. 数据多样性：数据通信系统需处理和传输各种不同性质、速率和实时要求的数据，对这些数据的处理、传输和存储进行统一的动态调度管理，同时保证其正确性和可靠性。
2. 信息传输高效率：数据传输速率可以高达1Mbit/s，100Mbit/s乃至1Gbit/s数据传输量更大。
3. 支持在轨操作：空间上具有航天器舱段间通信、航天器内外设备、遥测遥控、有效载荷、原位在线分析，以及航天员参与等各项复杂任务，数据系统的任务是能够支持所有操作类别，支持高速数据预处理、在轨更换和维修、有效载荷接入，以及即插即用和在轨实验操作等在线动作，且均能保障稳定可靠。
4. 天地一体化：在轨数据通信系统与地面通信系统联系日益紧密，呈现天地通信一体化发展趋势。
5. 可供国际合作：数据通信系统的通信标准和内容应能提供中国与国际合作的空间，便于进行各种有效载荷和空间技术的国际合作。

中国发射的航天器大量使用的使传统的控制总线，需要适当采用实时以太网作为主干通信以满足航天器中分布式网络通信需求：

1. 具有时间同步功能
2. 实时性较强，航天器控制场合的实时性一般以 μ s级，其他场合在ms级。
3. 时间确定性，保证数据完整和响应的一致性，完全控制时序抖动。
4. 高速带宽传输
5. 支持实时数据与非实时数据的共享通道传输
6. 可靠性，节点出现故障不影响网络整体。
7. 兼容性，向下兼容

普通以太网的缺陷

- 实时性：普通以太网采用冲突检测 / 载波监听多路访问（CSMA/CD）机制实现通信介质层的接入，并采用重发机制进行差错控制。当出现多个节点同时向总线发送数据将出现冲突，系统将经过一个随机延时后重新发送该数据，直至成功或达到最大重发次数。这种重发机制在网络受到干扰时跟为严重。不具备强实时性。
- 普通以太网在网络高负载时地由于重发机制增加了网络通信的不确定性。排在队列头尾的报文到达的时间相差较大，与航天器的及时响应的通信需求不符
- 普通以太网依赖于网络节点的可靠性和传输过程的稳定，未考虑节点和传输媒介产生故障后的性能保证问题，不足以使系统具备良好的冗余性能和快速恢复能力。

TTE的优点

- 时间触发架构（Time-triggered Architecture, TTA）系统和事件触发架构（Event-triggered Architecture, ETA）系统的工作原理不同。时间触发根据时间进程进行信号控制；而事情触发的控制信号来则是根据某件事件的发生（如一次中断）。在 TTA 系统中控制总是驻留在分布式计算机系统的内部。在 ETA 系统中，控制信号可能源自计算机内部，也可能源自计算机系统外部的环境 (如中断机制转发过来的)。不可预测的环境将因而导致计算机系统的不确定性的行为。
- TTE可使各个端节点进入网全网同步无竞争状态(Contention Free)。在 TTE 网络中，通过动态的执行时钟同步算法，使整个 TTE 网络维护一个全局时间，并依靠此时间来进行不同端节点发送和接收数据的调度，这样就可以大幅度减小传输时延和抖动，使终端之间的信息交换完全基于全局的时间来进行，保证了存在确定的系统时间偏移和通信延迟。
- 时间触发以太网是基于普通以太网结构的一种新颖的通信方式，将单个物理通信设备用于具有混合关键性要求的分布式工控系统中，通过同步和调度策略建立时间分区，以此确保关键数据流与非关键数据流的隔离，并保证关键数据流的实时性。
- TTE：高实时性、高资源利用率和高容错性
- 时间触发以太网一定会在将来得到广泛的应用，尤其是在航空航天领域，逐步取代目前广泛使用的 1553b总线协议

发展历史

- 1993年维也纳科技大学的团队提出了时间触发协议（Time-Triggered Protocol）的概念，用来解决分布式控制应用中的实时性和可靠性问题。
- 1998年，奥地利的TTTech公司接管了Time-Triggered Protocol（TTP）的开发工作，并提出时间触发架构（Time-Triggered Architecture）的设想，为分布嵌入式系统的设计和实现提供了计算机基础架构。
- 随着**交换式以太网**在**嵌入式应用**中适应性改造的深入，TTTech公司，在2001年至2005年研制了实验性的TTE交换机；2005年至2008年，推出工业应用TTE交换机和TTE端系统。
- 技术得到工程实用和应用基础研究的双重推动。在航天电子领域，美国Orion载人飞船采用1000BASE-CX物理层和双冗余配置的TTE网络综合互连方案，考虑了抗恶劣环境的高完整性。
- TTTech公司于2008年发布了TTEthernet规格说明书，并经过SAE标准化组织的AS-2D“时间触发系统与体系结构”分委会牵头TTE网络的标准化工作，由SAE组织于2011年11月形成并发布了**SAEAS6802“时间触发以太网”标准**。
- 2009年美国国家航空航天局（NASA）与TTTech公司签署空间应用建设高容错性网络协议，并将合作制定空间网络标准，适用于NASA计划和空间系统部署未来的空间网络。
- 2013年，美国宇航局的猎户座MPCV太空船首次启用了基于TTEthernet的网络方案，用于飞船的通信主干网。2014年12月，首次使用TTEthernet的确定性以太网解决方案的NASA Orion测试飞行完成。
- 2016年，TTTech与欧洲航天市场领导者Airbus Safran Launchers签署长期开发协议，利用TTEthernet作为Ariane 6系列发射器的航空电子主干网。
- TTTech公司目前还参与了由德国航空航天机构赞助的OBC-SA项目
- TT-GbE 是TTEthernet的一个变种，被部署在NASA的猎户座宇宙飞船上，作为机载数据网络（ODN）的一部分

国内研究现状

- 相比于国外TTEthernet的飞速发展，国内在这一领域的研究还比较滞后，没有企业或机构与TTTech达成战略合作协议，更没有TTEthernet在航空航天或车载总线领域投入实际生产或应用中的例子。
- 国内研究成果中，都是以理论分析、软件仿真为主，缺乏自主创新和研发，当务之急是大力发展理论研究的同时，制定符合我国标准的TTEthernet规范，将理论成果转化为TTEthernet芯片设计，拉近我国和国外在TTEthernet这一领域的差距，为我国的航空航天技术提供新一代的网络总线支持，掌握自主知识产权，实现TTEthernet技术的本土化。

标准相关信息

时间触发以太网（Time-Triggered Ethernet, TTE）是在交换式网络互连环境下的时间触发通信技术，可以提供微秒级的分布式时钟同步服务，是一种**实时以太网**解决方案。其交互报文根据一个**确切的时间调度表**进行传输，报文的传输时间延迟是确定的，时间延迟的抖动是微秒量级。时间触发通信机制的引入，增加了网络状态的时间信息量，增强了系统的时间确定性，提高了实时服务质量和错误隔离能力，并且为分布式综合化处理提供了服务基础。

- 它兼容了时间触发协议和以太网技术优势，能够在同一个网络平台上兼容普通网络数据流、AFDX数据流和TTE网络数据流，具有更高的安全性和强有力的容错机制。
- SAE AS6802标准并不重新定义标准IEEE802.3标准以太网（大量的实时以太网是建立在其基础上的，IEEE802.3以太网在LAN/WAN中得到了广泛的应用。IEEE802.3规模可扩展，支持全双工，但是无实时性，传输效率低）或AFDX（航空电子全双工交换式以太网 Avionics Full Duplex Switched Ethernet）等专用以太网，仅在以太网协议基础上规定可用于**时间触发通信（TT）和分区管理的故障冗余同步协议**。通过链路层的改造，增强以太网服务的时间确定性，提供一种能够以**固定的端到端延迟和微秒级时延抖动**进行确定性消息传递的服务，以及具有灵活性的时分多路复用的带宽划分。

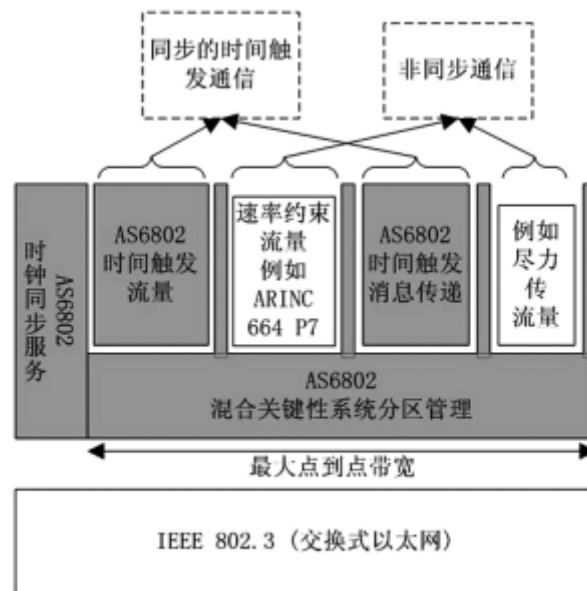
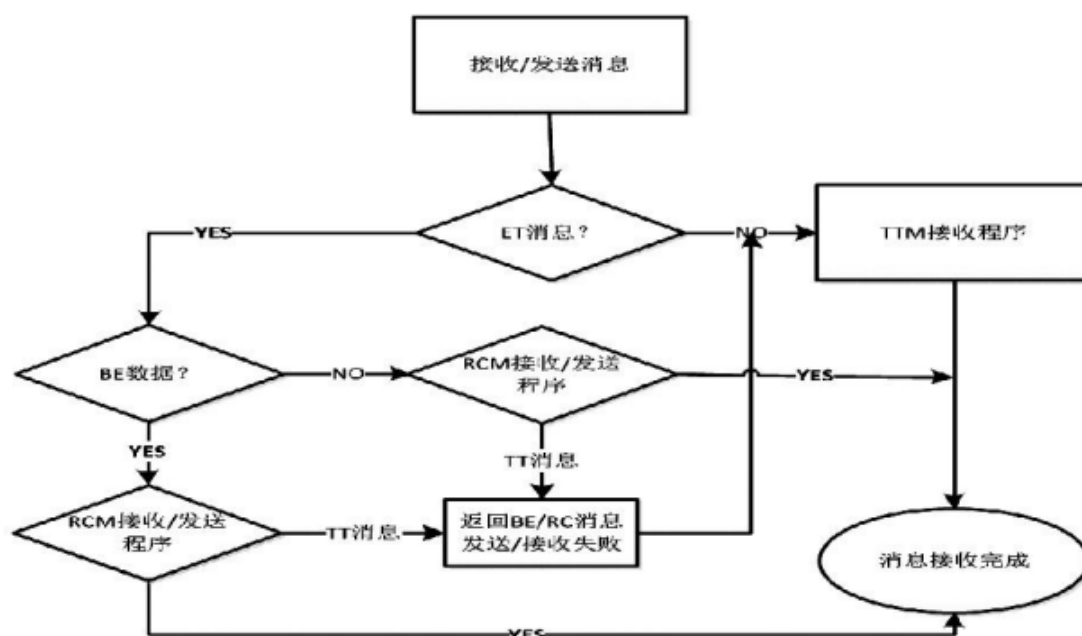
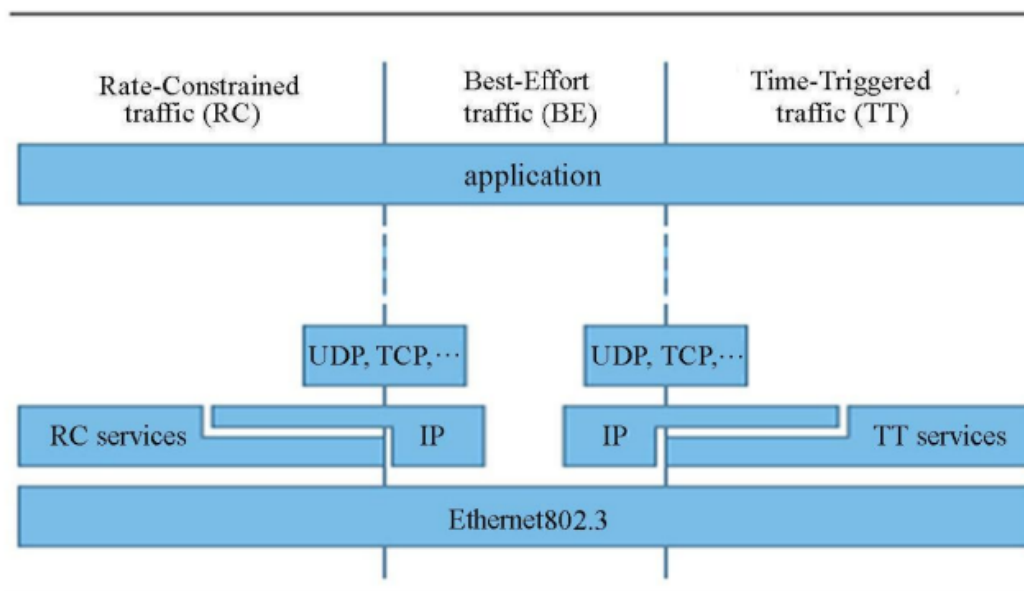


图1 TTE网络的带宽划分示意图

- TTEthernet向下完全兼容普通以太网和AFDX，用户可以在TTEthernet中同时运行普通以太网（“尽力传” BestEffort, BE），AFDX（速率约束 RateConstraint, RC）和TTEthernet（Time-Triggered TT）3种报文通信，形成混合关键性的通信服务。此外，TTEthernet交换机完全兼容IEEE802.3标准及其上层协议，并在OSI参考模型第2层增加了时间触发的网络功能，**符合有关国际标准**，可以使用价格合理的元件和带以太网接口的嵌入式微控制器，并可以与现有的子系统集成，最大限度地**降低应用成本**。



- TTE网络可以用RC流量承载AFDX虚拟链路，起到向下兼容和保护既有投资的作用，并能够在TT与RC流量共存的情况下，提供容错、故障封闭、通信监视等完整性保证机制。
- TTE网络的微秒级时间触发通信的**定时精度**远高于AFDX网络允许的0.5ms时延抖动界限
- 采用TTEthernet的该系统即使存在多个故障仍然可以继续工作，维修可以推迟至定期检修时进行，且定期检修周期可相应延长。

除对不同类型的流量以及不同周期的 TT 消息进行整合外，TT 以太网交换机还可以将 RC 消息转换为 TT 消息，或者反向转换。

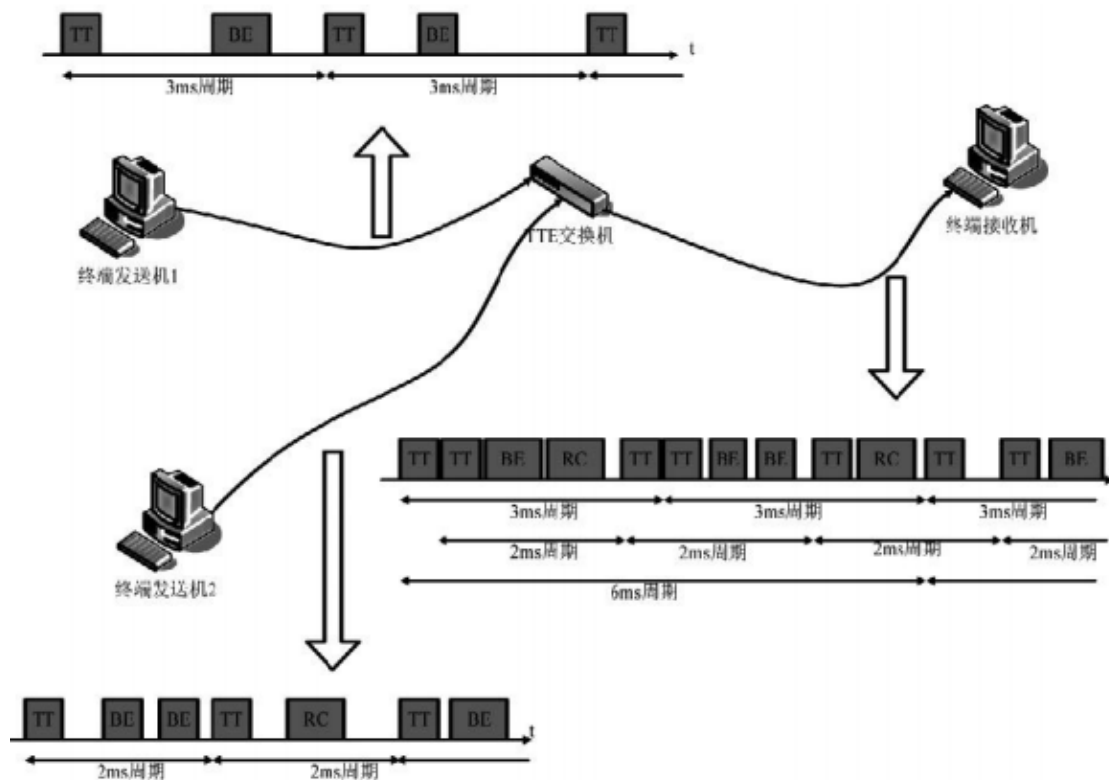


图 2 TTE 数据整合实例

基本原理

- 可以跨越交换机的精确的分布式时间同步 是TTE网络通信的基础
- TTE包含同步主控器（Synchronization Master, SM），同步客户端（Synchronization Client, SC），压缩主控器（Compression Master, CM）3种功能组件。在TTE网络中，嵌入式节点根据时钟同步的功能相应地担当SM，SC或CM的角色，统称同步节点。
- 同步节点需要支持格式如图2的协议控制帧（Protocol Control Frame, PCF）。
 - “综合循环”域的计数标记正常同步操作时的PCF所属的综合循环；
 - “同步优先级”使得CM能够根据优先级区分其可接收的PCF帧；
 - “同步域”用于标识可以通过传递PCF帧实现同步的节点集合；
 - “类型”字段的枚举值用于识别PCF的类型——冷启动帧（CS）、冷启动应答帧（CA）和综合帧（IN），前两者用于启动过程，后者在每一次综合循环开始后传输，定期维持分布式时钟的同步服务；
 - PCF帧的“透明时钟”字段（来自IEEE1588v2标准中“透明时钟”概念）用于储存从发送节点到当前节点操作所经历的时间（当PCF帧经过支持透明时钟的TTE设备时，由硬件将从报文输入到输出的时间值记录并累加到该字段，从而使接收节点可以得到各段传输延迟的累加值）。

	0~15		16~51	
0	综合循环			
32	新成员			
64	保留			
96	同步优先级	同步域	类型	保留
128	保留			
160	透明时钟			
192				

图2 协议控制帧的格式

- 分布式时钟同步原理：SAEAS6802标准定义了复杂的**协议状态机**，通过启动或重新启动建立综合循环。在每个综合循环开始的时候，TTE网络经过如图3所示几个步骤完成同步。在综合循环的同步服务之后，根据离线设计的时间调度表组织节点之间的TT通信，TT通信后的剩余时间片可以用于RC通信。若干综合循环构成集群循环。
 - 多个SM在本地时钟到达综合循环的预设时间点，向相应的CM发送IN类型的PCF帧；
 - CM收到后运行固化功能，通过透明时钟字段携带的传输延迟数值计算还原SM发送IN的真实时刻时序；
 - CM对固化后的时刻运行压缩功能，得到它们的加权均值作为时钟修正的基准值；
 - CM以此基准值对本地时钟进行修正，同时向SM和SC发送压缩后的IN帧；
 - SM和SC以此基准值修正自己的本地时钟。

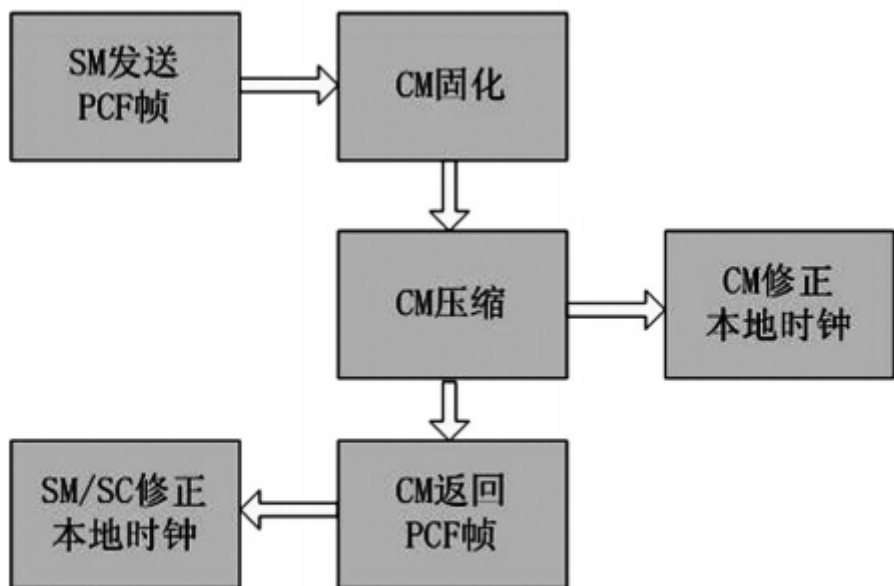


图3 TTE一个综合循环内的同步操作

- 接收节点并不能直接测得确切的发送时刻 t_d ，只能通过本地时钟测得接收时刻点的值 t_r ，但只要利用先验设定的最大传输延迟 D_{max} 和透明时钟值记录的PCF帧从发送端到接收端所经历的传输延迟 D_t ，可计算得到固化时刻点的确切值 t_p ，即： $t_p = t_r + D_{max} - D_t$ 。

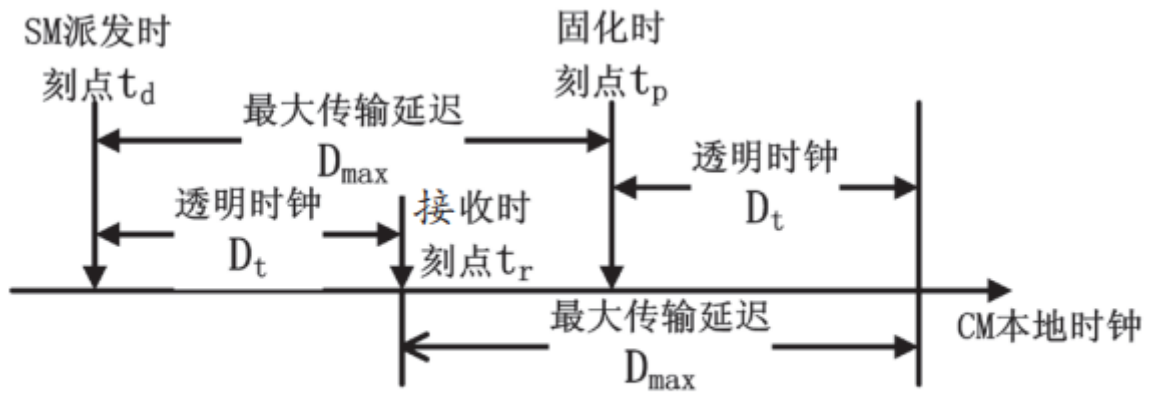


图4 固化功能时刻图

- 压缩功能将一组由SM发送的具有时间差的同步数据帧的固化时刻点压缩到一个平均时刻点，即压缩时刻点 t_{cp} 。CM将一组接收的PCF帧中最早的一个固化时刻点 $t_{p,1}$ 作为起始点，开启**固定长度的观察窗口**，采集该组帧其余所有的固化时刻，直到最大观察窗长度 T_{OWM} 。每个固化时刻相对第一个固化时刻的时间差进行加权平均，加权平均后的结果称为压缩修正 (T_{cc})，该过程计算的固定时间开销为 T_{co} ，则： $t_{cp} = t_{p,1} + T_{OWM} + T_{co} + T_{cc}$ 。以 t_{cp} 为基准，CM将PCF帧发送回SM，SM仍使用固化功能接收。由于 D_{max} 、 T_{co} 等参数先验已知，往返传输延迟由透明时钟可测，实质上使得每个参与同步的节点可以依据同一个压缩修正值 T_{cc} 调整本地时钟。

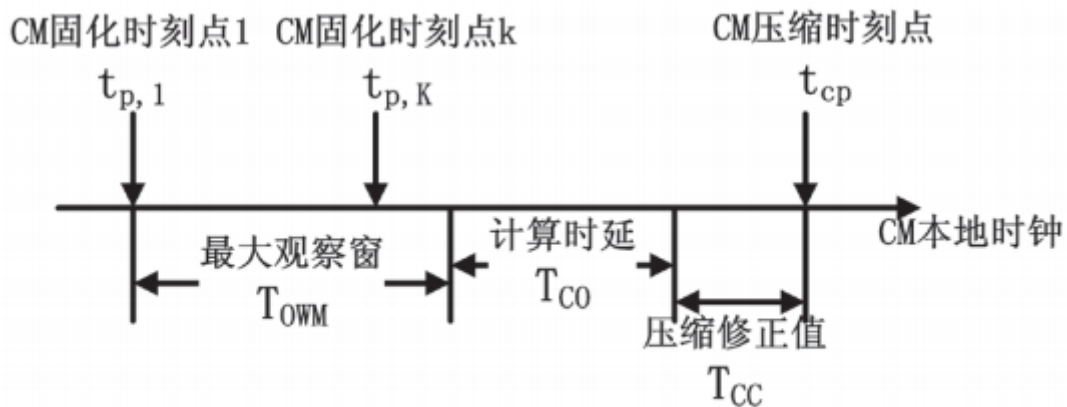
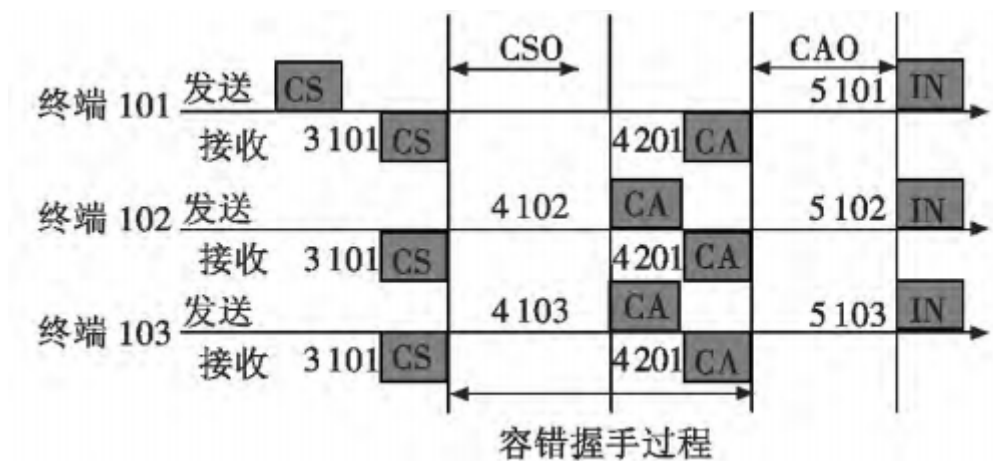


图5 压缩功能时刻图

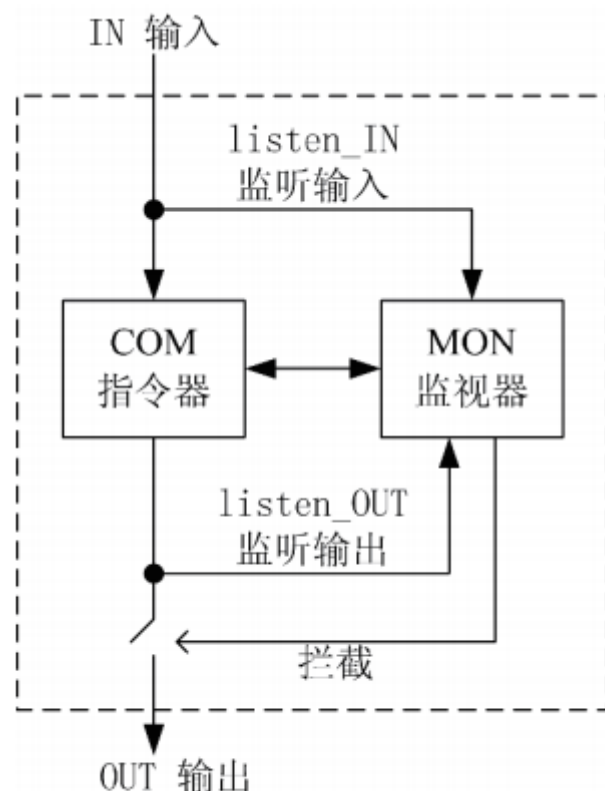
- TTE网络的时钟同步服务的分布式算法在运行中会遇到**结团 (clique) 问题**，即：同步成员中的部分设备形成了“小集团”，在它们之间能够维持同步，但其它设备无法参与同步。为了发现这个问题，在每个综合循环中SM和CM周期性的运行**结团检测**，并将和当前节点处于同步和不处于同步的节点通过“本地同步成员列表”和“本地异步成员列表”分别进行记录。
- 网络启动:图中: CSO 表示冷启动偏移超时计时器; CAO 表示冷启动响应帧超时计时器; CS 表示冷启动帧; CA 表示冷启动响应帧; IN 表示集成帧，发送集成帧意味该节点进入了同步状态。



基本特点

容错能力

- 时钟同步服务容错：TTE网络节点本地时钟之间通过综合循环来同步系统时间，而不需要外部的时钟源，也不需要搜索最优主时钟，失效压力下的操作可以容忍多点故障，容忍拜占庭同步故障等。
- 利用精确的时钟同步，TTE网络还可以实现故障封闭等机制，增强实时通信的完整性。TTE被设计对抗两种失效假设：单节点失效和双节点失效。



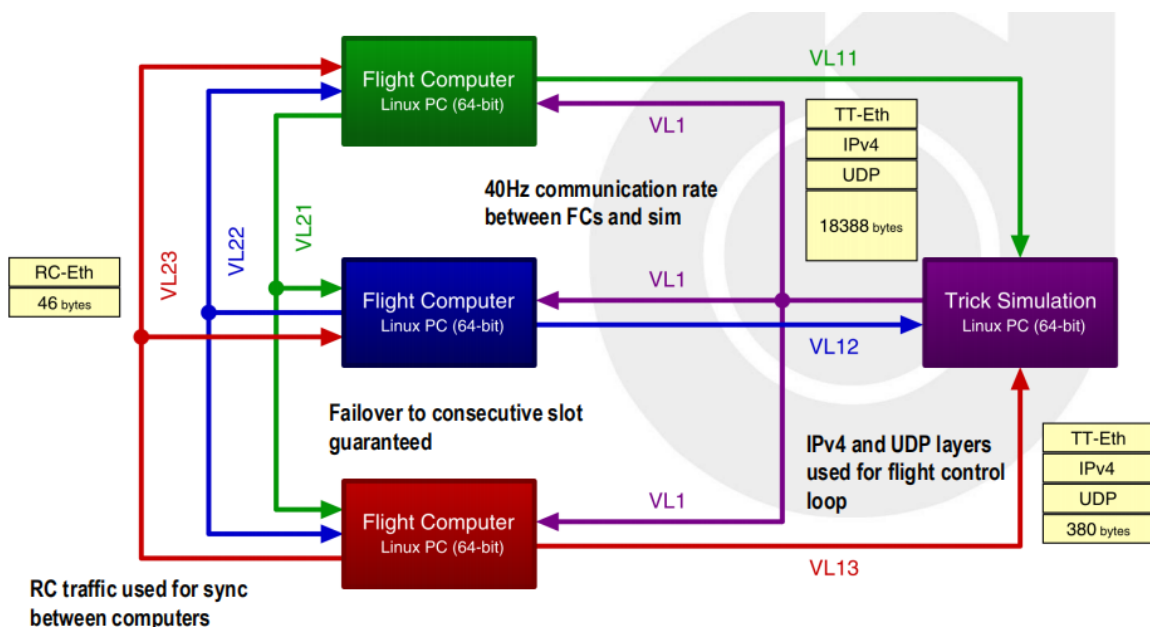
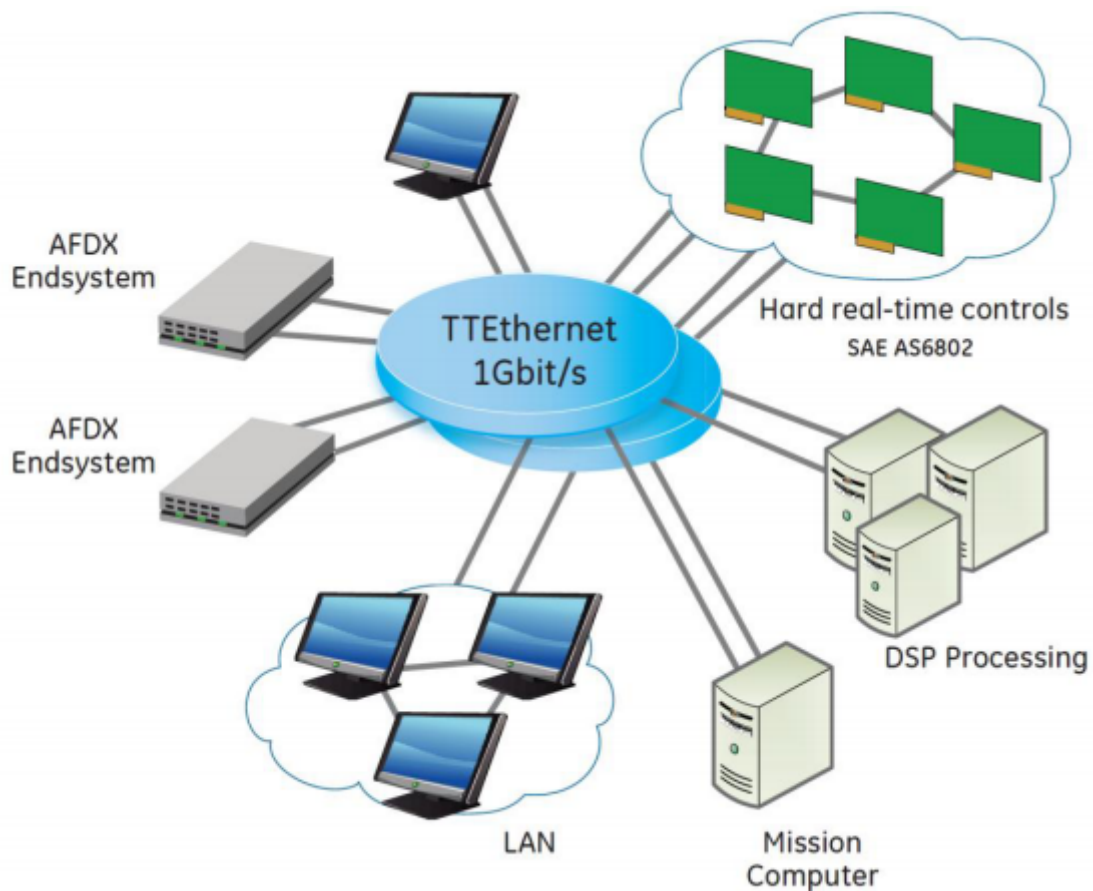
核心 COM/MON假设：

- COM和MON独立失效
- MON能够截断COM产生的故障消息
- COM不能产生一个在listen_OUT和OUT表现出不同有效性的消息
- MON自身不能通过将listen_OUT反转到OUT，或通过切换截断信号产生故障消息

图6 成对的COM/MON构成高完整性设计

上升中止2 (AA-2)模拟

- 发射中止系统(LAS)携带CM远离上升助推器
- 目标是测试同步冗余控制循环的能力
- 冗余飞行计算机结构实验环境
- 需求：消息有效负载大小从模拟到20,000字节，每个以太网链路的吞吐率高达100Mbit/s。采用独立的网络适配器
- 实现拓展TTEthernet 库，其API允许应用程序发送或接收封装为UDP以及IPv4包的数据报的消息，作为TT、RC或BE流量。TTEthernet终端系统中的控制器通过直接内存访问(DMA)功能实现通信，从而实现千兆的传输速度
- 基于网络的CFS调度程序



每个测试被分成60个不同的1分钟试验，在此期间，一台计算机以特定的传输速率不断地向接收计算机传输特定协议和流量类的消息。所使用的消息有效负载大小被选择来表示每个流量类可能被利用的公共数据长度

应用前景

在未来20年，我国大中型民用飞机的需求量将 超过4000架，我国未来双通道C929飞机的航电系将瞄准新型体系结构和更深层次的综合，**时间触发网络技术**及其配套的**标准化研究工作**将有望为我国大飞机的发展提供有利的帮助。

比较：

类型特性	EPA	SERCOS-III	TTEthernet	AFDX
实时与非实时	实时与非实时	实时与非实时	实时与非实时	实时与非实时
处理方法	实时数据 分时传输	实时数据 分时传输	实时数据 分时传输	实时数据 分时传输
保证实时、确定性方法	分时传输， 链路层调度， 微网段	集总帧 + 实时 信息按主战和 从站分时传输	时间触发， TDMA 时 间槽	虚拟链路， 链路层调度， 流速流量控制
同步方法	IEEE1588	主节点 + 循 环周期	类 IEEE1588	
连接方式	交换机	环形拓扑，无集 线器和交换机	交换机	交换机