

## 可用于航空电子系统的时间触发以太网

张英静, 熊华钢, 刘志丹, 李振  
(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:**近年来,分布式综合模块化航空电子系统的发展,对航空电子网络提出了更高的要求。时间触发以太网以其特有的优势,可保障数据通信的强实时性,提高网络服务质量,为航空电子网络指明了升级方向。在概括航空电子系统对网络通信要求的基础上,描述常用航空电子网络的特点,指出了时间触发以太网的优势。对时间触发以太网的分析,表明其满足航空电子系统升级要求,是新一代飞机网络技术发展的重要方向。

**关键词:**时间触发以太网; 分布式综合模块化航空电子系统; 航空电子系统; 实时性

**中图分类号:** V243 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0049-05

## Application of TTE Communication Technology in Avionics System

ZHANG Ying-jing, XIONG Hua-gang, LIU Zhi-dan, LI Zhen  
(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In recent years, the development of Distributed Integrated Modular Avionics (DIMA) brings higher demands on aviation electronic networks. Time Triggered Ethernet (TTE) can guarantee strong real-time communication, improve the quality of network service and indicate the upgrade direction for aerospace electronic networks. In this paper, the requirement of avionics system to network communication is summarized, the characteristics of the avionics network are described, and the advantages of Time Triggered Ethernet are pointed out. The analysis to Time Triggered Ethernet shows that it can satisfy the upgrade of avionics system and is an important direction of the new-generation aircraft network technology in the future.

**Key words:** Time Triggered Ethernet (TTE); Distributed Integrated Modular Avionics (DIMA); avionics system; real-time performance

### 0 引言

从1903年第一架飞机问世到现在,短短百年间,航空电子技术日新月异,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>[1]</sup>。综合式航空电子系统和先进综合式航空电子系统的架构核心都是综合模块化航空电子系统(Integrated Modular Avionics, IMA)<sup>[2-3]</sup>。分布式综合模块化航空电子系统(Distributed Integrated Modular Avionics, DIMA)<sup>[4-5]</sup>是基于IMA的改进,采用物理上分布式放置综合模块,是未来航空电子系统的发展方向。

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,基于时间触发通信机制的分布式交换网络可以在先进综合式航空电子系统的基础上实现DIMA。该技术已经得到美国国家航空航天局,以及空中客车公司等国外航空设计制造企业的重视<sup>[6-7]</sup>。时间触发以太网(Time-Triggered Ethernet, TTE)<sup>[8]</sup>是在IEEE802.3以太网上实现的时间触发网络协议,是适用于航空电子系统信息传输的具有高通信确定性的飞机数据网络系统,可同时满足主干网络和关键系统的应用需要,从发展趋势看,TTE有望作为航空电子全双工交换式以太网(Avionics Full Duplex, AFDX)互连的子集,在大中型飞机的综合化互连中占据一定的份额。

### 1 航空电子系统对网络通信的要求

实现航空电子系统的高度综合化,需要从系统设

收稿日期:2014-06-14

修回日期:2015-01-13

基金项目:国家自然科学基金(61301086);航空科学基金(20131951027);基础科研业务(YWF-13-D2-XX-01)

作者简介:张英静(1987—),女,河北邢台人,博士生,研究方向为航空电子网络。

计上加以保证,如图 1 所示。

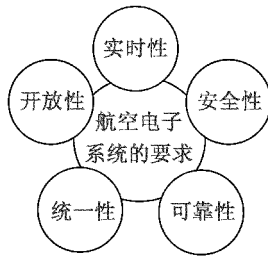


图 1 航空电子系统的要求

Fig. 1 Avionics system requirements

主要体现在以下几个方面。

### 1) 实时性。

新一代航空电子系统中为了满足数据融合和功能综合的需求,必须保证消息在规定的时间内传输。若处理节点与其他功能节点的通信不能及时满足,会导致整个系统的反应能力降低,根据美国 SAE 组织预测,新一代飞行器平台的传感器数据传输与分配网络应在每秒几千兆位的速率下提供不大于  $100 \mu\text{s}$  的传输延迟。

### 2) 安全性。

对于航空电子系统来说,系统的信息安全和保障是设计和实施中的一个关键。航空电子系统只有在确保自身的信息安全之后,才能保证整机任务安全执行,系统的安全和保障需要从总体框架上去考虑,需要严格贯彻总体设计思想,严格采取安全措施,进行风险评估。

### 3) 可靠性。

可靠性是一个系统整体的品质因素,作为飞行器电子系统的一个重要组成部分,网络传输的可靠程度对系统的可靠性会产生重要影响,常用传输误码率来表征数据传输系统的可靠特性。

### 4) 统一性。

航空电子系统高度综合化的基础是模块化,离开了模块化,航空电子系统不可能进行功能综合。航空电子系统各个功能区内部与功能之间都存在着各种传输需求,造成系统软硬件开放的复杂性,为了满足航空电子系统的各种传输需求,统一网络应具有低延迟时间、容错能力和可扩展规模的特性。

### 5) 开放性。

航空电子系统广泛采用开放式系统结构,不仅能提高系统的冗余和重构能力,还可以用最低的生命周期费用达到所要求的任务性能和保障性,而且为系统功能的扩展和性能的改进奠定基础<sup>[9]</sup>。

## 2 TTE 与其他网络/总线的对比

### 2.1 机载常用网络/总线介绍

ARINC429 主要面向民用飞机领域,已应用于波音

公司的 B727, B737, B747, B757, B767 客机以及空中客车公司的 A310, A320, A330, A340 客机。ARINC429 结构简单、技术完善,具有强实时性和传输效率高等优点。但其速率较低,只适用于数据带宽要求不苛刻的场合<sup>[10-11]</sup>。

CAN 是主要面向工业控制的现场总线,已应用于 Eurocopter 公司全天候救援直升机、Ae270 商用和小型运输机。CAN 具有数据传输帧短(可通过仲裁场实现基于优先级的无损通信)、硬件接口简单、实时性较好、技术成熟等优点,但和 ARINC429 一样存在通信速率低的缺点<sup>[12]</sup>。

TTP 为 SAE 制定的面向实时应用的总线标准应用于 F-16, A380 和 B787。TTP 采用时间触发技术进行通信,可满足飞机关键系统的应用需要,技术成熟。但由于采用了总线结构,系统通信带宽低,可扩展性差,导致了网络规模有限,不能满足飞机主干网络应用的需要<sup>[13]</sup>。

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<sup>[14]</sup>。

AFDX 基于 IEEE802.3 以太网实现的事件触发网络协议,其消息的通信类型符合 ARINC664 标准 Part7 的定义。AFDX 适用于具有一定通信确定性的飞机数据网络系统,在 A380, B777 和 A400M 中均有应用。通过建立虚拟链路,在以太网中保证了数据传输的延迟上限和抖动下限,有较好的实时性,但通信中的冲突导致资源利用率有限,实际应用中不超过 35%<sup>[15]</sup>。

TTE 在 NASA 火星探测项目中得到了洛克希德·马丁公司、通用电气、Honeywell 公司、西科斯基飞机公司等机构的应用支持。TTE 虽然也是交换式网络,但采用了精确的系统时钟同步传输,可以做到通信不相互冲突,资源利用率可达 90%<sup>[16-17]</sup>。

### 2.2 TTE 应用优势

TTE 的应用优势主要体现在下述几个方面。

#### 1) 系统集成特性。

TTE 主要在 IEEE 以太网标准的基础上提供可预测的实时性,在现有的以太网应用程序基础上无需修改任何软件和硬件,便可直接移植到 TTE 中。TTE 系统的这个特点使其更加符合市场的需求。

#### 2) 消息传输的确定性。

消息传输延迟最小化和传输可确定性的特点使得 TTE 可以更好地满足航空电子系统强实时性的要求。时间触发(Time-Triggered, TT)消息通过离线调度方式,使通信任务和收发操作具有完全的时间确定性。

#### 3) 全局时钟的容错性。

全局时钟同步是时间触发系统可用性的基础。全局时钟的任何差错可能导致整个系统的失败,容错的时钟精度在TTE设计和实现中尤为重要。文献[10]已经给出TTE时钟同步的方法。

#### 4) 故障隔离的优势。

在系统物理结构确定的情况下,安全性方面在很大程度上要求强大的故障隔离特点。如果一个节点出现破坏事故,则系统必须保证其他任何节点不会受到影响。TTE的这种特点消除了误差传播,避免了由于一个节点错误而破坏整个传输网络的情况出现。

#### 5) 错误诊断的一致性。

对于一个分布式系统来说,在任何时刻,所有正确节点应对哪些节点是错误节点达成一致,这对系统的重新配置和恢复至关重要。非对称节点出现错误可导致其他正确节点间的认知错误,这些认知不同的错误可由相应的算法得到解决。

#### 6) 可扩展性。

网络系统的可扩展性需求决定了新设计的网络系统具有适应用户企业未来发展的能力,最终体现在网络拓扑结构、网络设备,特别是硬件服务器的选型,以及网络应用系统的配置等方面。一个TTE集群内的终端和交换机具有同一个同步优先级,多个集群可以构成更大的网络,不同集群可相对独立运作。

## 3 TTE 通信技术

### 3.1 TTE 体系结构

传统标准以太网采用事件触发方式来通信,事件触发即由事件的发生引导下一步的处理。事件发生时,若系统满足所要求的资源,则对事件要求的计算资源给予响应;否则,将导致延迟、不稳定甚至不可预测的结果发生<sup>[18]</sup>。时间触发通信技术是由时间驱动传输的通信机制,通过增强网络的时间确定性,能够很好地满足新兴的航空电子系统架构理念和严格确定性通信需求。

与标准以太网相同,TTE也是基于交换机进行互联,构成交换式数据交换网络。TT服务的通信控制器按照定义的全局时钟进行数据通信,实现了时间触发的功能,因此,保证了任意两个消息不会竞争使用同一条通信链路。图2所示为TTE的TT服务协议栈与其他以太网协议栈的对应关系。

如图2所示,由于TTE协议只是定义了一个协议控制帧,用于整个网络的时间同步,因此,不用修改消息的内容,通过网络之间的互连协议(Internet Protocol, IP)或用户数据包协议(User Datagram Protocol, UDP)等上层消息很容易生成TT消息<sup>[10]</sup>。除了TT传输,非

TT的通信可以在TT间隔内出现,这实现了TTE中单一的物理网络上支持具有不同实时需求的通信。

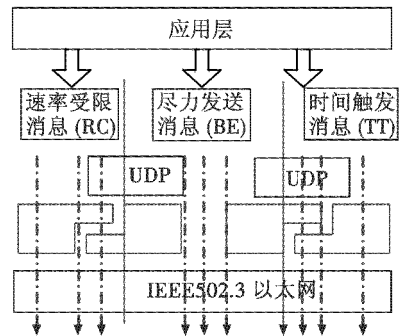


图2 协议栈对应关系

Fig. 2 Protocol stack correspondence

TTE在单一网络中可以满足不同实时和安全等级的应用需要,可以支持3种不同类型的数据通信,即TT消息、速率受限(Rate Constraint, RC)消息和传统以太网的尽力发送(Best Effort, BE)消息<sup>[19]</sup>,消息的类型可通过消息的目的地址相区别。

在3类消息中:TT消息的优先级最高,只有交换机在确认时间槽中没有TT消息在通信时,才将空闲时间槽分配给其他类型的数据流,TT消息在预先定义的时刻进行通信,采用全局时钟同步,通信实时性最好,适用于消息延迟小、延迟抖动小的确定性通信场合;RC消息用于实现确定性和实时性比TT网络相对较弱的应用,在同一时间点,不同的控制器可以发送消息到同一接收端,导致不同的消息需要在交换机中排队,通信消息的抖动增加;相对于TT消息和RC消息,BR消息利用网络剩余的带宽进行数据传输,优先级最低,在网络中没有TT消息和RC消息的情况下,网络所有带宽都分配给BE消息使用,BE消息实现了传统的以太网通信,具有传输灵活的优势,但不保证消息是否能够发送,消息延迟的长短也不确定。

### 3.2 时钟同步协议

TTE中的节点根据在时钟同步过程中的不同功能,分为同步主节点、压缩主节点和从节点3种类型:同步主节点是指提供本地时钟参与全局同一时间计算的节点;压缩主节点是指对各同步主节点发送的时钟按一定的算法进行表决计算,生成全局同一时间的节点;从节点是指主节点、压缩节点以外的网络节点。

通常情况下,同步主节点为终端,压缩主节点为交换机,TTE通过两步消息处理实现网络同步,同步流程如图3所示。

同步算法由底层硬件实现。在图3a中,同步主节点以时间触发方式向压缩主节点发送协议控制帧(Protocol Control Frame, PCF),PCF的内容与同步主节

点的本地时钟有关,并且在传输过程中记录相关的传输延迟。压缩主节点根据这些协议控制帧到达的时间计算一个时间平均值,形成新的协议控制帧。在图 3b 中,压缩主节点向同步主节点和从节点同时发送新生成的协议控制帧,二者根据新的协议控制帧矫正自己的本地时钟,实现全局同步<sup>[7]</sup>。

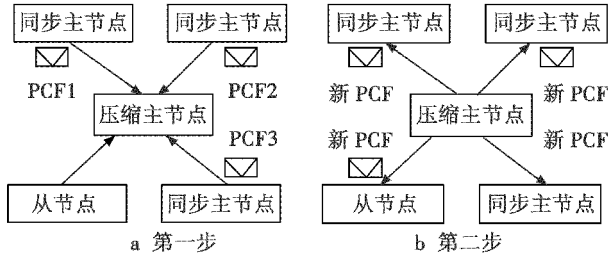


图 3 同步流程

Fig. 3 Synchronization Process

### 3.3 网络启动过程

网络启动过程是从网络上电到实现系统同步的过程。图 4 所示为一个计算网络的启动过程。

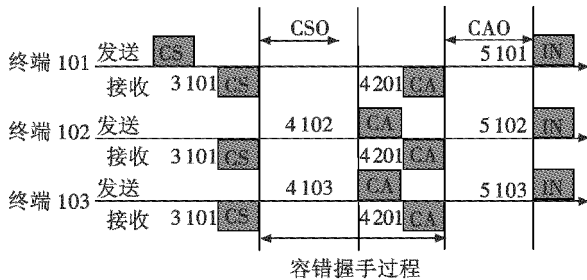


图 4 网络启动过程

Fig. 4 Network booting process

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。

如图 4 所示,主节点 101 发送出冷启动帧 3101,压缩主节点根据发送的主节点设置冷启动帧,并转发该帧到所有节点,每一个主节点可以确定发送冷启动帧的节点并选择是否对收到的由自己发送出的冷启动帧进行响应,在本场景中所有主节点 101~103 都配置成不对由自己发送出的冷启动帧进行响应。

主节点 102 和 103 将在冷启动偏移超时计时器 CSO 长度时间后,发送冷启动响应帧 4102 和 4105。压缩主节点对 4102 和 4103 进行压缩计算,生成新的启动响应帧 4201,冷启动帧 4201 随后被压缩主节点发送至 101~103。节点 101~103 接收到冷启动帧 4201 后,设置冷启动响应帧超时计时器 CAO,在 CAO 超时后进入同步状态,并发送集成帧 5101~5103。

## 4 总结与展望

随着对飞机功能和性能需求的不断增长,航空电子系统的成本急剧上升,目前已占据战斗机总成本的 40%,其性能优势也是飞机先进性的标志之一。航空电子网络负责航空电子系统之间的互连通信,是飞行器的神经中枢,必须具有高可靠性,在执行飞行任务时,网络通信要保持稳定性、耐久性和安全性。现代飞机的任务和功能越来越多,航空电子系统也越来越复杂,这对航空电子网络提出了更高的要求<sup>[20]</sup>。

本文分析了航空电子系统的主要需求特性,并对比了机载常用网络和总线的优缺点,指出了 TTE 是适用于航电系统信息传输的具有高通信确定性的飞机数据网络系统,得到了国内外军、民用飞机厂商的广泛关注和支持,是新一代飞机总线/网络技术发展的重要方向。

### 参考文献

- [1] 熊华钢,王中华. 先进综合航空电子技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2009. (XIONG H G, WANG Z H. Advanced avionics integrated techniques [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [2] 熊华钢,李峭,黄永葵. 航空电子全双工交换式以太网标准研究(续) [J]. 航空标准化与质量,2008(2):20-23. (XIONG H G, LI Q, HUANG Y K. Research on avionics full duplex switched Ethernet standard [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2008(2):20-23.)
- [3] SPITZER C R, FERRELL T, FERRELL U. Digital avionics handbook [M]. 2nd ed. Florida: CRC Press, 2007.
- [4] WOLFIG R, JAKOVLCVIC M. Distributed IMA and DO-297: Architectural, communication and certification attributes [C]//Proceedings of 27th Digital Avionics Systems Conference (DASC), Saint Paul, Minnesota: IEEE/AIAA, 2008:1. E. 4-1-1. E. 4-10.
- [5] WATKINS C B. Design consideration for system hosted on integrated modular avionics platforms [C]//The 27th Digital Avionics Systems Conference, 2008:1A2-1-1A2-7.
- [6] KOPTEZ H. Real-time systems design principles for distributed embedded applications [M]. 2nd ed. Berlin: Springer Verlag, 2011.
- [7] SAE Aerospace. SAE AS6802 time-triggered ethernet [S]. SAE International, 2011.
- [8] KOPETZ H. The rationale for Time-Triggered Ethernet [C]//The 29th IEEE Real-Time Systems Symposium, TUWien, Austria, 2008:3-11.

- [9] 熊华钢. 机载高速数据总线系统研究[D]. 北京:北京航空航天大学,1998. (XIONG H G. Research on airborne high-speed data bus system[D]. Beijing:Beihang University, 1998. )
- [10] STEINER W. Synthesis of static communication schedules for mixed-criticality systems [ C ]//Proceedings of 14th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops (ISORCW), 2011 :11-18.
- [11] YOUSAF U. Embedded solution for system on chip: ARINC429 and UART interfaces [ J ]. WSEAS Transactions on Electronics, 2006, 3(2) :85-92.
- [12] CiA Draft Standard 301 Version 4.02. CANopen application layer and communication profile[ S ]. Nuremberg, 2002.
- [13] SAE Aerospace. SAE AS6003 TTP communication protocol[ S ]. SAE International, 2009.
- [14] ADEMAJ A, KOPETZ H. Time-Triggered Ethernet and IEEE1588 clock synchronization [ C ]//Proceedings of ISPCS, Vienna, IEEE, 2007 :41-43.
- [15] ARINC Specification 664P7. ARINC664 Aircraft data network, part 7: Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) network [ S ]. Maryland: Airlines Electronic ARINC664 Engineering Committee (AEEC), 2005.
- [16] STEINER W. TTEthernet specification[ Z ]. TTTech Computertechnik AG, Vienna, Austria, 2008.
- [17] STEINER W. An evaluation of SMT-based schedule synthesis for Time-Triggered multi-hop networks[ C ]//Proceedings of RTSS, San Diego, CA, 2010 :375-394.
- [18] WILCOCK G, TOTTEN T, GLEAVE A, et al. The application of COTS technology in future modular avionic systems [ J ]. Electronics & Communication Engineering Journal, 2001, 13(4) :183-192.
- [19] STEINER W, BAUER G, HALL B, et al. TTEthernet dataflow concept [ C ]//Proceedings of 8th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, Cambridge, MA :IEEE, 2009 :319-322.
- [20] 刘成. 时间触发 AFDX 网络关键技术研究[ D ]. 北京:北京航空航天大学,2012. (LIU C. Research on key technologies of Time-Triggered AFDX network[D]. Beijing: Beihang University, 2012. )
- (上接第 48 页)
- 间协同问题研究[ J ]. 舰船电子工程, 2013, 33(9) :35-36, 44. ( ZHANG Z W, WANG G H, XIE Y P. Time-coordination of the cooperative anti-ship missile attack organized by airplane formation and ship formation [ J ]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(9) :35-36, 44. )
- [2] 曾家有, 宋友凯, 车志宇. 基于航路规划的反舰导弹发射顺序和间隔研究[ J ]. 航天控制, 2009, 27(2) :22-25. ( ZENG J Y, SONG Y K, CHE Z Y. Research on launch sequence and interval of anti-ship missile based on route planning [ J ]. Aerospace Control, 2009, 27(2) :22-25. )
- [3] 程绍成, 刘敬蜀, 张广法. 基于发射时间序列的反舰导弹联合突防方法[ J ]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(3) :289-291. ( CHENG S C, LIU J S, ZHANG G F. A anti-ship missile joint penetrate method based on launch time series model [ J ]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2013, 28(3) :289-291. )
- [4] 雷兴明, 邢昌凤, 吴玲, 等. 基于分布式约束优化的多平台导弹协同航路规划[ J ]. 电子学报, 2012, 40(10) :2068-2072. ( LEI X M, XING C F, WU L, et al. Path planning for multi-platform missiles based on distributed constrained optimization [ J ]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(10) :2068-2072. )
- [5] 李红亮, 宋贵宝, 李高春. 反舰导弹协同攻击航路规划与重规划[ J ]. 电光与控制, 2012, 19(12) :18-22. ( LI H L, SONG G B, LI G C. Route planning and re-planning of anti-ship missiles in coordinated operation [ J ]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(12) :18-22. )
- [6] 卢发兴, 吴玲, 董银文. 无航路规划能力的反舰导弹盲目射击方式初探[ J ]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11) :2658-2662. ( LU F X, WU L, DONG Y W. Blind launch of anti-ship missiles without route-planning capability [ J ]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(11) :2658-2662. )
- [7] 卢发兴, 吴玲, 董银文. 带航路规划的反舰导弹盲目射击攻击模型及性能研究[ J ]. 电子学报, 2009, 37(9) :1956-1960. ( LU F X, WU L, DONG Y W. Research on the attacking mode for blind launch of anti-ship missiles with route-planning capability [ J ]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9) :1956-1960. )
- [8] 曾家有, 钟建林, 高青伟. 舰艇编队组织反舰导弹协同饱和和攻击任务规划问题分析[ J ]. 飞航导弹, 2012(5) :24-26, 40. ( ZENG J Y, ZHONG J L, GAO Q W. Research on mission planning of naval fleet anti-ship missile saturation attack [ J ]. Aerodynamic Missile Journal, 2012 ( 5 ) : 24-26, 40. )