

## 时间触发以太网在航空电子系统中的应用

蒋社稷<sup>1</sup>, 卢海涛<sup>2</sup>, 史志钊<sup>1</sup>, 聂志强<sup>1</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 北京航空航天大学可靠性与系统工程学院, 可靠性与环境工程重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 首先,介绍了分布式综合模块化航空电子系统(DIMA)的架构,然后,分析了时间触发以太网(TTE)的特性,最后,针对DIMA架构下的TTE的通信调度问题,提出了基于TTE组循环周期、TT消息调度表周期和剩余时间的调度方法,并对生成的通信调度表进行了分析和评价。

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

**中图分类号:** V243 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0084-05

## Application of Time-Triggered Ethernet in Avionics System

JIANG She-ji<sup>1</sup>, LU Hai-tao<sup>2</sup>, SHI Zhi-zhao<sup>1</sup>, NIE Zhi-qiang<sup>1</sup>

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China; 2. Key Laboratory of Reliability and Environmental Engineering, Reliability and Systems Engineering Institute, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The framework of distributed integrated modular avionics (DIMA) is introduced at first. Then the characteristics of Time-Triggered Ethernet (TTE) are described. Considering the TTE's communication scheduling problem in DIMA architecture, a scheduling method is presented based on TTE cluster cycle, period of TT message scheduling table and remaining time, and analysis is made to the generated TTE communication scheduling table.

**Key words:** DIMA; TTE; communication scheduling table

### 0 引言

由于标准以太网具有高带宽、低成本、开放式架构的突出优点,近几十年研究人员探索采用各种方法对标准以太网进行改造以满足实时通信需求,主要有时间触发以太网(Time-Triggered Ethernet, TTE), Ethernet POWERLINK, MODBUS-TCP, ADFX等。TTE是TTTech公司在标准以太网基础上开发的一种基于时间触发协议的通信网络,由于其将标准以太网协议、AFDX协议和时间触发协议集成到了一起,同时具有标准以太网和时间触发通信网络的优点,因而特别适合于混合关键安全性系统的应用场合<sup>[1-2]</sup>。

分布式综合模块化航空电子系统(Distributed IMA, DIMA)是在综合模块化航空电子系统(Integrated Modular Avionics, IMA)的基础上发展起来的一种航空电子系统架构,具有分布式和混合关键安全性等新

特点。由于TTE较好地满足了DIMA的要求,因而是DIMA的理想备选总线网络,但TTE并未规定消息调度方法,其消息调度机制需要根据实际应用场合进行定制,本文针对DIMA应用场合,提出了一种TTE通信调度方法,并对其实现方法进行了描述和分析。

### 1 DIMA概述

DIMA是在IMA的基础上发展起来的,IMA采用了标准化的一系列模块(如数据处理模块、信号处理模块、图形处理模块、网络路由模块等)组成一个核心处理平台,各功能子系统通过时间/空间分区的操作系统(如Vxworks653)运行在核心处理平台上<sup>[3]</sup>。这种架构节省了航电系统的体积、重量、功耗,实现了航空电子系统的开放式架构。但IMA架构只强调了功能的集中整合以共享处理资源,但不是所有子系统功能均适合进行集中处理,特别是在混合关键安全性系统中,IMA架构的功能集中原则限制了系统架构的进一步优化。DIMA的提出可较好地解决这个问题,DIMA实际上是一种分布式、混合关键安全性的系统,可以将不同安全级别的功能,如音频、视频、实时关键性控制数据

收稿日期:2013-09-13

修回日期:2015-03-02

作者简介:蒋社稷(1983—),男,河南洛阳人,硕士,工程师,研究方向为嵌入式系统工程。

(如飞控、火控数据)等集成在一个网络系统中。正如 DO-297 描述的那样, DIMA 采用了 TTE 支持的 TDMA 通信带宽分区技术, 可实现时间/空间/带宽分区, 创造了在同一网络资源中分享关键和非关键功能<sup>[4-5]</sup>。这意味着对于运行一个实时控制流程来说, 可不必关注其在系统所处的位置、是否还集成了其他功能、是否运行在特定的计算模型上等因素的限制, 这就允许完全自由地优化系统架构而不必受到系统集成的限制。典型的 DIMA 架构如图 1 所示。

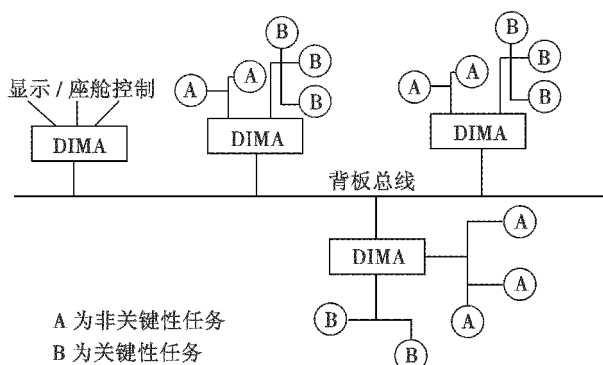


图1 分布式综合模块化航空电子系统  
Fig.1 DIMA

## 2 TTE 协议

TTE 是 TTTech 公司计算机互联工作组针对工业控制和航空航天等高安全系统的特殊应用而开发的一种实时以太网, 目前支持 100 Mbit/s 和 1 Gbit/s 速率。TTE 物理层采用标准以太网 IEEE802.3, 且在 OSI 参考模型中第 2 层设计了一个特殊的 QoS, 使 TTE 不但完全兼容标准以太网, 而且同时符合 ARINC664 P7 (AFDX) 和 SAE AS6802 标准<sup>[6]</sup>。

### 2.1 TTE 网络架构

图 2 所示为一个典型的 TTE 网络架构。该架构由以下部分组成: 1) 一系列网络节点 (3 个标准以太网节点, 1 个 AFDX 节点, 3 个 TTE 节点); 2) 3 个交换机 (1 个标准以太网交换机, 2 个 TTE 交换机)。

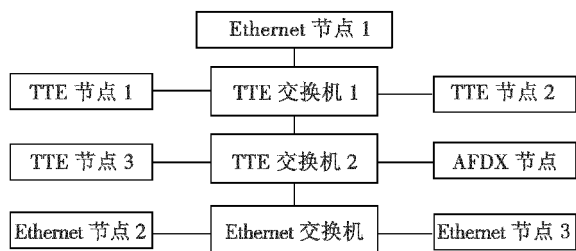


图2 时间触发以太网系统网络架构  
Fig.2 Structure of a TTE system

从图 2 中可以看出, TTE 节点和 AFDX 节点只能与 TTE 交换机连接, 而标准以太网节点既可以与普通

以太网交换机连接, 也可与 TTE 交换机进行连接。

### 2.2 TTE 消息类型

TTE 在单一网络中为满足不同实时和安全等级的应用需要, 设计了如下所述的支持 3 种不同类型的数据通信。

1) 时间触发消息 (TT 消息)。TT 消息的传输首先需要在参与通信的网络节点中建立时间同步, 然后在 TT 消息的调度机制下进行传输<sup>[7]</sup>, 这种通信方式保证了 TT 消息传输的低抖动和固定延时, 可用于航空电子系统中实时性、安全性和可靠性要求最高的安全关键系统。

2) 速度受限消息 (RC 消息)。RC 消息与 TT 消息不同, RC 消息并不需要在严格的时间同步约束下进行传输, 它是遵循了 ARINC664 P7 标准的 AFDX 消息, 采用了虚拟链路 (VL)、带宽分配间隙 (BAG)、抖动等措施来保证数据传输的固定带宽和确定延时, 可有效避免消息传输过程中的冲突, 从而使 RC 消息具有了实时性和确定性。

3) 尽力发送消息 (BE 消息)。BE 消息符合 IEEE 802.3 标准, 与现有标准以太网完全兼容, BE 消息无实时性保证机制, 适合于典型的互联网应用服务。

在实际应用中, 这 3 种消息的优先级顺序为 TT 消息 > RC 消息 > BE 消息, 并分时占用物理链路。

### 2.3 TTE 时间同步策略

由于 TTE 的时间触发特性, 其 TT 消息传输需要在整个网络系统中建立一个全局统一的时钟, 所有 TT 消息的通信基于全局时间来进行, 以保证通信延迟和时间偏移的确定性。为了实现时间同步, TTE 引入了同步控制器 (Synchronization Master, SM), 同步客户端 (Synchronization Client, SC), 压缩控制器 (Compression Master, CM) 3 种角色<sup>[8]</sup>。另外, 为将传输延时计算在时钟同步过程中进行, TTE 设计了时钟同步协议控制帧 (Protocol Control Frame, PCF), PCF 内部有时钟域, 通过专用设备记录所有数据帧在节点中的驻留时间, 并通过压缩算法计算后改写时钟域, 使数据帧的节点驻留时间得以积累, 则最终的总延迟时间为节点驻留时间与路径延迟的总和。

TTE 的时钟同步过程分为两步: 首先, SM 向与其相连的 CM 发送时钟同步控制帧 PCF; 然后, CM 向与其相连的 SM 和 SC 发送压缩后的时钟同步数据帧。具体过程如图 3 所示。

1) CM 采集所有一个或多个 SM 发送的 PCF, 并通过压缩函数计算相关 PCF 到达时刻的平均值后更新 PCF, 并更新本地时钟 CCM, 这种同步过程被称为 CM 同步。

2) 与之相连的 SM 和 SC 接收 CM 发送的更新后的 PCF, SM 根据 PCF 调整本地时钟 CSM, 被称为 SM 同步。

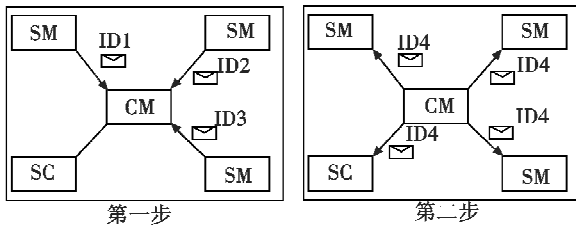


图 3 TTE 时钟同步流程图

Fig. 3 Time synechronization approach of TTE

从上述时钟同步的过程可以看出:在 TTE 时钟同步的过程中是将所有的 SM 时钟通过压缩算法计算出来的结果作为同步时钟,并不存在统一全局时钟。在实际应用中,由于各个节点本地时钟晶振存在抖动和漂移,在通信过程中也会出现各种干扰或其他不可预知的情况,又会造成系统的不同步,所以在系统运行的整个过程中需要周而复始地执行时钟同步过程。

### 3 DIMA 下 TTE 的调度方法

TTE 协议的时钟同步机制保证了网络中各个设备的时钟完全同步,这为 TT 消息的调度提供了必要条件,以避免帧之间发生争用物理链路的情况。由于 DIMA 具有分布式和混合关键安全性的特点,以图 2 所示的 DIMA 网络为例,假定网络上有 5 种周期消息(对于事件消息,为减小复杂性,按条件周期消息处理),其在 DIMA 网络中的分布如表 1 所示。

表 1 DIMA 网络消息分布表

Table 1 The message distribution of DIMA network

TT 消息名	源节点	目标节点	TT 消息周期/ms
A	TTE 节点 1	TTE 节点 3	2
B	TTE 节点 2	TTE 节点 1、TTE 节点 3	2
C	TTE 节点 1	TTE 节点 2、TTE 节点 3	3
D	TTE 节点 2	TTE 节点 1	3
E	TTE 节点 3	TTE 节点 2	4

为保证实时性和减小 TTE 调度复杂度,本文设计了一种按照静态通信调度表进行周期性调度的方法,该调度表的生成基于 3 个要素,即 TTE 组循环周期、TT 消息调度表周期和剩余时间。

#### 3.1 TTE 组循环周期

TTE 组循环周期是指在一个 TTE 网络中,一组 TT 消息完成传输所需的循环时间。所有 TT 消息的调度传输均在组循环周期内重复进行,为避免 TT 消息传输的冲突,组循环周期大小为组内所有 TT 消息周期的最小公倍数,图 2 中 DIMA 网络有编号为 A, B, C, D, E 的 5 种 TT 消息,其传输周期分别为 2 ms, 3 ms, 3 ms, 4 ms, 4 ms, 则组循环周期为 12 ms。

#### 3.2 TT 消息调度表周期

TT 消息调度表周期是指在 TT 消息调度时,人为设定的最小调度间隔时间。同样以图 2 中 TTE 网络为例,本文通过以下 2 个步骤可推导出 2 种 TT 消息调度表周期。

1) 计算最小周期。最小周期可以是 TT 消息的传输周期,但必须小于等于传输周期最小值,若最小周期大于该值则除 2 再次进行比较,直到满足要求。根据这种方法,传输周期分别为 2 ms, 3 ms, 3 ms, 4 ms, 4 ms 的一组 TT 消息的最小周期分别为 2 ms, 1.5 ms, 1.5 ms, 2 ms, 2 ms。

2) 确定 TT 消息调度表周期。每个 TT 消息的调度表周期在最小周期的基础上确定,其值需小于等于传输周期,且为  $N * \text{最小周期}$  ( $N$  为正整数) 中的最大值。根据这种方法,基于最小周期为 2 ms 的 TT 消息调度表,周期分别为 2 ms, 2 ms, 2 ms, 2 ms, 2 ms; 基于最小周期为 2.5 ms 的 TT 消息调度表的周期分别为 1.5 ms, 3 ms, 3 ms, 3 ms, 3 ms。

#### 3.3 剩余时间

本文提到的剩余时间是指在 TTE 网络中 TT 消息传输完成后剩余的时间,这段剩余时间可以用来传输 RC 与 BE 消息。剩余时间调度方法分连续式剩余时间法和分布式剩余时间法 2 种。

连续式剩余时间调度法原理如图 4 所示。在一个通信周期中,首先完成所有 TT 消息的连续传输,剩余时间排放在周期的最后时间段,这种调度方法剩余时间片较大,适合于传输较大的 RC 和 BE 消息包。

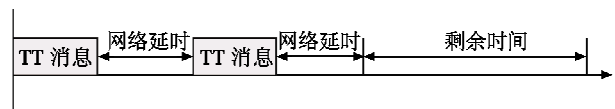


图 4 TT 消息连续式剩余时间调度法

Fig. 4 TT messages scheduled in continuous offset form

分布式剩余时间调度法原理如图 5 所示。

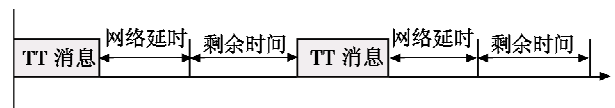


图 5 TT 消息分布式剩余时间调度法

Fig. 5 TT messages scheduled in distributed offset form

在一个通信周期中 TT 消息和剩余时间均按分布式方法进行调度,这种调度方法使得 TT 消息和 RC + BE 消息有同样的几率进行调度传输,但由于该调度方法的剩余时间片相对较小,适合于传输较小的 RC 和 BE 消息包。

### 3.4 TTE 通信调度表的生成

图2所示的TTE网络可根据以上3个要素生成4张网络通信调度表,如表2~表5所示,表中A,B,C,D,E为图2中DIMA网络中周期分别为2ms,3ms,3ms,4ms,4ms的5种TT消息,详情见表2。

表2 网络周期调度表 a

Table 2 The periodic scheduling timetable (a) of network

组循环 周期/ms	调度表周期/ ms	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息
12	2	A	B	C	D	E
	2	A	B	C		
	2	A			D	E
	2	A	B	C		
	2	A	B	C	D	E
	2	A				
	2	A				

表3 网络周期调度表 b

Table 3 The periodic scheduling timetable (b) of network

组循环 周期/ms	调度表周期/ ms	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息
12	2	A	B	C	D	
	2	A				E
	2	A	B	C	D	
	2	A	B			E
	2	A		C	D	
	2	A	B	C		E

表4 网络周期调度表 c

Table 4 The periodic scheduling timetable (c) of network

组循环 周期/ms	调度表周期/ ms	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息
12	1.5	A	B	C	D	E
	1.5	A				
	1.5		B	C	D	E
	1.5	A				
	1.5	A	B	C		
	1.5				D	E
	1.5	A	B	C		
	1.5	A				

表5 网络周期调度表 d

Table 5 The periodic scheduling timetable (d) of network

组循环 周期/ms	调度表周期/ ms	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息
12	1.5	A	B		D	
	1.5	A		C		E
	1.5		B			
	1.5	A		C	D	
	1.5	A	B			E
	1.5			C		
	1.5	A	B		D	
	1.5	A		C		E

表2~表5所示为针对整个DIMA网络的调度表,对于具体的TTE节点和TTE交换机也可以按照网络周期调度表生成节点和交换机的调度表,以表4为例,生

成的TTE节点1(node1)发送周期调度表如表6所示。

表6 node1 发送周期调度表

Table 6 The periodic scheduling timetable sent by node1

组循环 周期/ms	调度表周期/ ms	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息
12	1.5	A		C		
	1.5	A				
	1.5			C		
	1.5	A				
	1.5	A		C		
	1.5				C	
	1.5	A				

交换机的调度表数量与跟交换机连接的节点和交换机端口数目相等,以TTE交换机1与交换机2连接的端口(SW1\_SW2)为例,其在表4条件下生成的发送周期调度表见表7。

表7 SW1\_SW2 发送周期调度表

Table 7 The periodic scheduling timetable sent by SW1\_SW2

组循环 周期/ms	调度表周期/ ms	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息	TT 消息
12	1.5	A	B	C		
	1.5	A				
	1.5		B	C		
	1.5	A				
	1.5	A	B	C		
	1.5					
	1.5	A	B	C		
	1.5	A				

本文按照TTE组循环周期、TT消息调度表周期和剩余时间3个要素针对图2所示的TTE网络生成了4张网络周期调度表,见表2~表5,在实际应用中,考虑到网络的扩展性一般以剩余时间判断法作为评价标准,即以调度表剩余时间数目和长度作为评判标准,从结果中可以看出,表4剩余时间数目和长度最优。

## 4 结论

TTE具有分布式网络特性和时间触发机制、且能兼容标准以太网和AFDX网络,这保证了数据传输的实时性、高安全性和网络的分布式,能够满足DIMA架构的应用需求。针对TTE应用中的消息调度问题,本文提出了基于TTE组循环周期、TT消息调度表周期和剩余时间3个要素的消息调度方法,可生成多种TTE静态周期调度表,在实际应用中可根据系统特点、总线负载、实时性要求等进行综合考虑,从而制定出合适的周期调度表。

## 参 考 文 献

- [1] 朱闻渊,尹家伟,蒋祺明. 新型航空电子系统总线互连技术发展综述[J]. 计算机工程, 2011, 37(s):398-402. (ZHU W Y, YIN J W, JIANG Q M. Development summary of new avionic system bus interconnection technology [J]. Computer Engineering, 2011, 37(s):398-402.)
- [2] 牛文生,王乐. 机载计算技术的新进展[J]. 航空科学技术, 2012(4):1-4. (NIU W S, WANG L. Latest development of airborne computing technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(4):1-4.)
- [3] 周强,熊华钢. 新一代民机航空电子互连技术发展[J]. 电光与控制, 2009, 16(4):1-6. (ZHOU Q, XIONG H G. Development of the new generation civil avionic interconnection technology [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(4):1-6.)
- [4] EVELEENS R L C. DO-297 Integrated Modular Avionics (IMA) development guidance and certification considerations[M]. Washington, DC:RTCA, 2006.
- [5] 刘帅,张喜民,郭鹏. TTE 通信技术在混合安全关键系统的应用[J]. 航空计算技术, 2013, 43(2):120-122. (LIU S, ZHANG X M, GUO P. Application of TTE communication technique in mixed safety criticality system [J]. Aeronautical Computing Technique, 2013, 43(2):120-122.)
- [6] SAE International. SAE AS6802 Time-Triggered Ethernet[Z]. The United States:SAE, 2011.
- [7] GE. TTEthernet—A powerful network solution for advanced integrated systems[Z]. GE Intelligent Platforms White Paper gft751a, 2010.
- [8] 刘晚春,李峭,何峰,等. 时间触发以太网同步及调度机制研究[J]. 航空计算技术, 2011, 41(4):123-127. (LIU W C, LI Q, HE F, et al. Research on Time-Triggered-Ethernet synchronization and scheduling mechanism [J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(4):123-127.)

(上接第 36 页)

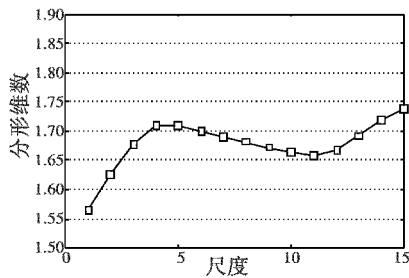


图 3 多重分形维数

Fig. 3 Multifractal dimensions of EM signal

## 5 结 束 语

分形理论为研究非线性复杂系统中的各种课题提供了新的理论和方法。为了证明分形理论能否应用于复杂电磁环境信号研究,根据分形的基本性质从标度不变性和自相似性两个方面验证了电磁环境信号的分形特征,并通过研究电磁环境信号局部分形特征,证明了其多重分形性。为应用分形理论研究复杂电磁环境的本质特征奠定了理论基础。

## 参 考 文 献

- [1] 朱华,姬翠翠. 分形理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2011. (ZHU H, JI C C. The fractal theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2011.)
- [2] 李水根,吴纪桃. 分形与小波[M]. 北京:科学出版社, 2002. (LI S G, WU J T. Fractal and wavelet [M]. Beijing: Science Press, 2002.)
- [3] 鹿瑾,张剑英,牛光东,等. 煤矿瓦斯浓度时间序列的分形特性研究[J]. 微计算机信息, 2010, 26(7):213-215. (LU J, ZHANG J Y, NIU G D, et al. Study on fractal characters of gas concentration series [J]. Microcomputer Information, 2010, 26(7):213-215.)
- [4] 张济忠. 分形[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2011. (ZHANG J Z. Fractal [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.)
- [5] 张传忠,吴素琴,段田东,等. 数字调制信号多重分形特性分析[J]. 信息工程大学学报, 2011, 12(2):179-183. (ZHANG C Z, WU S Q, DUAN T D, et al. Multifractal characteristic analysis of digital modulation signal [J]. Journal of Information Engineering University, 2011, 12(2):179-183.)
- [6] CHAUDHURI B B, SARKAR N. Texture segmentation using fractal dimension [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(1):72-77.
- [7] MARAGOS P, SUN F K. Measuring the fractal dimension of signals: Morphological covers and iterative optimization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(1):108-121.
- [8] 王艳琼. DNA 序列分形特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2005. (WANG Y Q. Study on fractal characteristics of DNA sequence [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.)
- [9] COX D R. Long-range dependence: A review in statistics: An appraisal [M]. Ames: Iowa State University Press, 1984:55-74.
- [10] KINSNER W, VINCENT C, CANNONS K, et al. Signal classification through multifractal analysis and complex domain neural networks [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic, 2006, 36(2):196-203.
- [11] 杨娟,卞保民,闫振纲,等. 典型随机信号特征参数统计分布的分形特性[J]. 物理学报, 2011, 60(10):100506-1-100506-7. (YANG J, BIAN B M, YAN Z G, et al. Fractal characteristics of characteristic parameter statistical distributions of typical random signals [J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60(10):100506-1-100506-7.)