

# 基于 PETRI 网的 FC—AE—ASM 交换式 网络建模与性能分析

刘斌, 崔 颢, 韩应都

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 新一代航空电子系统从结构上发生了变化, 机载系统资源的共享程度越来越高, FC—AE—ASM (fiber channel—avionics environment—anonymous subscriber messaging) 协议作为新一代的高性能网络通信协议被引入到航空电系统中; 从 FC—AE—ASM 协议、交换机工作原理出发, 以 Petri 网为工具, 建立起网络结构模型、消息传输模型及交换机的工作原理模型; 对所建系统模型进行仿真, 可得出网络负载和消息延迟等性能指标, 通过对性能指标的分析, 为光纤通道网络在航空电子环境下的应用提供重要的理论依据。

**关键词:** 航空电系统中; FC—AE—ASM 协议; Petri 网; 建模与仿真

## Modeling and Performance Analysis of FC—AE—ASM Switched Network Which Based on PETRI Net Theory

Liu Bin, Cui Hao, Han Yingduo

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** The structure of new generation avionics systems has changed, sharing degree of airborne systems resources become higher and higher. FC—AE—ASM (The Fiber Channel—Avionics Environment—Anonymous Subscriber Messaging) protocols as high—performance network communication protocols of new generation was introduced into the avionics system. This article starts from the FC—AE—ASM protocol, the principle of switch works, with Petri—nets as a tool to establish a network model, message transmission model and switch works working principle model. Do simulation to system model which have built, can obtain results of network load and message delay performance trend indicators, through the analysis of the performance trend indicators, provide important theoretical basis for fiber channel network applications in avionics environment.

**Keywords:** avionics system; FC—AE—ASM protocol; Petri net; system modeling

## 0 引言

随着航空电子系统的发展, 航空电子网络上传输的不仅仅是数据信息, 而且还有大量的视频、音频信号, 这就要求航空电子通信网络具有更好的实时性、可靠性和可扩展性。光纤通道 (fiber channel, FC) 以其具有延迟低、兼容性好、可靠性高、传输速率快、传输距离远等优点, 成为了新一代高性能航空电子系统网络。为了适应在航空电子环境的应用, 光纤通道提供了一组有关在航空电子环境中应用的协议子集 FC—AE (fiber channel—avionics environment), 规范了在航空环境中光纤通道交换网络与环路拓扑连接设备的选择。FC—AE—ASM (fiber channel—avionics environment—anonymous subscriber messaging) 协议用于支持航空电子子系统之间确定、安全、低延迟的通信, 主要用于传输飞机的命令、控制信号处理和传感器/视频数据。例如<sup>[1]</sup>美国 AH—64D 长弓阿帕奇直升飞机中将其用于数字视频接口与飞行试验和任务处理器的互连; B1—B 中将其航空电子计算机和数据存储/传输设备间的光纤通道—仲裁环接口等。本文提出

一种基于 Petri 网的建模分析方法, 对 FC—AE—ASM 交换式网络传输机制进行建模仿真, 讨论具有交换机结构的 FC—AE—ASM 网络消息传输情况, 分析网络负载和延迟时间两个性能指标的变化情况。

## 1 随机 Petri 网

如果在 Petri 网的每一个变迁的可实施和实施之间关联上一个随机的延迟时间, 则此种类型的 Petri 网称为随机 Petri 网 (Stochastic Petri Net, SPN)。在连续时间随机 Petri 网中<sup>[2]</sup>, 一个变迁从可实施到实施需要延时, 即从变迁  $t$  变成可实施的时刻起到它实施时刻之间被看成是一个连续型随机变量  $x_t$  (取正实数值), 且服从于一个分布函数, 在不同类型的连续时间随机网中, 这个分布函数的定义是不一样的。在 Molloy 提出的连续时间 SPN 中, 与每个变迁相关的分布函数被定义成一个指数分布函数:  $\forall t \in T: F_t(x) = P\{x_t \leq x\} = 1 - e^{-\lambda_t x}$ ; 其中  $\lambda_t > 0, x \geq 0$ 。

$\lambda_t$  是变迁  $t$  的平均实施速率。可证明, 两个变迁在同一时刻实施的概率为零; SPN 的可达图同构于一个齐次 MC, 因而可用马尔可夫随机过程求解。

随着 SPN 所描述的系统模型的“状态空间爆炸”, 导致运用 SPN 对状态较大的系统难以进行定性和定量分析, 因此在 SPN 的基础上引入了瞬时变迁<sup>[3]</sup>, 形成了广义随机 Petri 网 (GSPN), 进一步如果允许某些时间变迁的实施延时为常数,

收稿日期: 2014-04-16; 修回日期: 2014-05-21。

基金项目: 航空科学基金项目 (2013ZA12001)。

作者简介: 刘斌 (1984—), 男, 河南洛阳市人, 工程师, 硕士, 主要从事机载武器系统方向的研究。

则 GSPN 即被扩充为 DSPN, 对应的变迁则称为确定时间变迁。

DSPN 定义<sup>[3]</sup>: 一个 DSPN 由一个 8 元组构成, DSPN = (P, T, I, O, H, M<sub>0</sub>, W, λ), 其中:

- (1) P = {P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, ..., P<sub>m</sub>}, 为位置的集合;
- (2) T = {T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, ..., T<sub>m</sub>}, 为变迁的集合;
- (3) I ⊆ P × T, 为输入弧的集合;
- (4) O ⊆ T × P, 为输出弧的集合;
- (5) H ⊆ P × T, 为禁止弧的集合;
- (6) M<sub>0</sub> = {M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, ..., M<sub>m</sub>}, 为初始标记的集合;
- (7) W = {W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>, ..., W<sub>n</sub>}, 为弧权函数的集合, 默认情况下, W<sub>i</sub> = 1;

(8) λ = {λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub>, ..., λ<sub>n</sub>}, 为定义在变迁集上的一个集合, 是表示变迁的平均实施速率的集合。

对于时间变迁, λ<sub>i</sub> 为变迁实施时延所服从的负指数分布的概率密度函数的参数; 对于瞬时变迁, λ<sub>i</sub> 为与变迁实施相关的一个随机开关, 而与此相应的概率分布为一个开关分布; 对于确定变迁, λ<sub>i</sub> 为一个时间常数。

### 2 FC-AE-ASM 网络的 DSPN 模型

利用 DSPN 对 FC-AE-ASM 交换式网络系统进行建模过程中<sup>[4]</sup>, 做如下设定:

- 1) 在每个消息传输过程中, 命令帧、数据帧和状态帧简化为一条满负荷的数据帧 (2 148 字节)。
- 2) 处理完一帧数据帧后, 接收端返回的 ACK 帧的时间简化为 0, 即接收端接收完一帧数据帧后可以立即接收下一帧数据帧。
- 3) 本模型中每次发送 N 条消息, 等 N 条消息传完之后再开始传送下一组的 N 条消息, 且假设消息产生的变迁为立即变迁。

基于上述设定条件可建立起 DSPN 模型, 这个模型可分三部构建, 即周期消息模型、交换机模型和系统模型。

#### 2.1 周期消息模型

如图 1 所示, 模型中产生周期性消息, 利用确定变迁 TStart, 其实施延时为 T, 表示系统每隔时间 T 产生一次消息。PStart 初始标记为 1, 表示有周期消息产生, 经过确定变迁 TStart 的延时变迁以及 T0 的瞬时变迁产生周期为 Tms 的周期消息。N 表示一个周期产生 N 条消息, TGap1 为随机延时变迁, 产生消息后 PMsg1 变为真, 此时为了防止拥堵, TGap1 有一条禁止弧, 即当 PMsg1 标记为零时, TGap1 才实施。

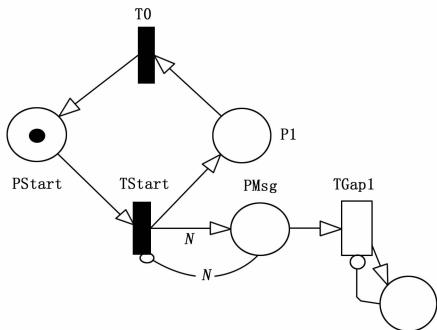


图 1 周期消息模型

#### 2.2 交换机模型

如图 2 所示, 本文交换机模型主要分两部分: 数据进入交叉开关缓冲区和利用加权轮询算法进行调度输出, 以下将对其进行分析。

数据进入交叉开关缓冲区, 模型中 PSwitch1 有标记表示

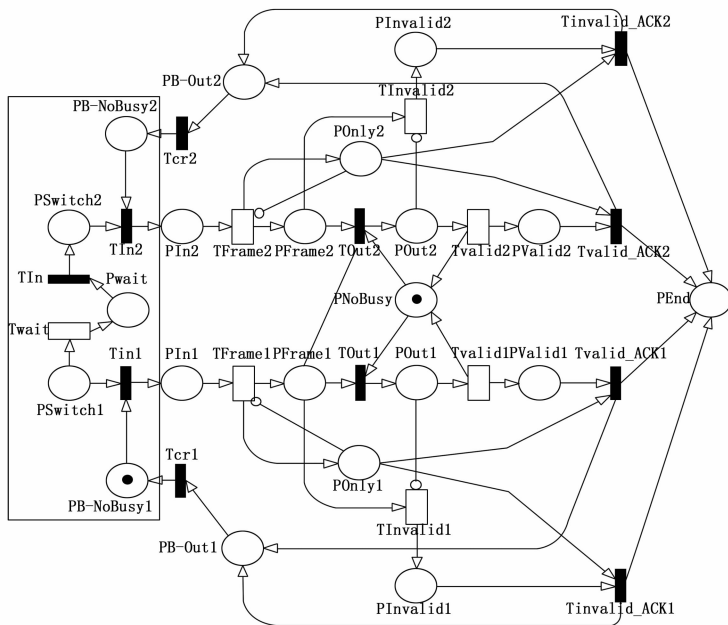


图 2 交换机模型

消息进入交换机端口一, PB\_NoBusy1 表示端口一的交叉开关缓冲区空闲, 则 TIn1 变迁实施, 消息进入端口一的交叉开关缓冲区, 等待输出。当端口一忙碌, PB\_NoBusy1 无标记产生时, 消息经过等待延时变迁 Twait 的实施, 进入延时等待, 然后标记流向 PSwitch2, 消息进入交换机端口二, 经过 TIn2 变迁实施, 消息进入端口二的交叉开关缓冲区, 等待输出。

利用加权轮询算法进行调度输出, 模型中 PIn1 有标记表示端口一交换缓冲区有消息待输出, TFrame1 变迁实施, PFrame1 和 POnly1 分别产生标记, PFrame1 表示端口一准备输出一条消息。POnly1 和 TFrame1 之间的禁止弧为了保证交换缓冲区内消息一条一条的传输。PFrame1 和 TOut1 之间的禁止弧为了保证当端口一中有消息传输时优先利用输出口输出消息。PFrame1 和 PNoBusy1 同时有标记表示有消息要传输出去此时输出口也空闲, 触发变迁 TOut1 实施, POut1 产生标记, 向输出口传输消息。变迁 Tvalid1 实施, Pvalid1 产生标记可知消息在规定时间内传输到输出口。POnly1 和 Pvalid1 同时有标记触发 Tvalid\_ACK1 实施, 消息传输结束, 同时回一个 ACK PB\_Out1 产生标记表示一条消息离开缓冲区; 当消息传输时限超过规定时限, PFrame1 产生标记触发 TInvalid1 变迁实施, 标记流向 PInvalid1, 说明该条消息超时, Tinvalid\_ACK1 变迁实施, 消息传输结束, 同时回一个 ACK 使 PB\_Out1 产生标记表示一条消息离开缓冲区, 下一条消息可以进入交换缓冲区。端口二同样适用端口一的消息经加权轮询调度逐条从输出口输出。

#### 2.3 系统模型

由以上两个主要部分可以构成 FC-AE-ASM 网络整个

系统的 DSPN 模型, 如图 3 系统模型所示, 整个网络传输模型由周期消息传输模型和交换机传输模型两部分组成。

延迟时间。

1) 网络负载 (BUS Loading): 它是实际传输与最大可能允许的传输量的比值。模型中可用位置 PSend 的标记数来表示网络负载, 即: 网络负载 =  $E\{PSend\}$ ;

2) 系统延迟时间 (或称透明度): 它是指在信源处信息启动时间与吸收点处执行时间二者的时间差值。本模型的延迟时间定义如下:

$$延迟时间(DT) = \frac{E\{PTransfer\} \times N}{\lambda}$$

### 3.1 仿真参数设定

本文模型中光纤通道的传输速率为 1 Gbps, 一个满负荷的数据帧的字节数为 2 148 个, 故一个满数据帧的传输时间为 0.002 148 ms。而交换机处理速度为 100 Mbps, 故一个满数据帧的传输时间为 2 148 / (100 × 10<sup>6</sup>) s = 0.021 48 ms; 另外, 由于本文研究的是光纤通道中的交换机, 故传输时限值为 100 μs, 一个数据帧在输出 0.1 ms 后没有被输出端口收到就认为超时; 时间间隔 TGap1、TGap2、TGap5 以及帧间隔 TValid1、TValid2 都将根据工程实践取经验值设定。

### 3.2 系统性能分析

1) 当周期消息产生间隔 T 为 10 ms 固定不变, 变化周期消息数 N 时, 来讨论周期消息数 N 对系统性能的影响。仿真数据见表 2, 变化规律如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 中可以看出, 在 T = 10 ms 情况下, 随着消息数 N 的不断增大, 系统的网络负载呈现出线性增加, 这主要是因为随着周期消息数目的增加, 网络上单位时间内通过节点的消息数也是增加的, 因此网络负载会随着消息数目的增加而加大, 由于消息数目在产生和传输的过程中是一样的, 所以网络负载随消息数目呈线性增大。但是总体保持在总线负载的百分之十以下, 说明光纤通道完全能够满足苛刻环境下航电系统的带宽需求; 系统的延迟时间也随着消息数 N 的增大, 近似于线性增大。但延迟时间绝对值很小, 说明光纤通道表现出传输速度的优越性, 能很好地提高了系统传输数据的实时性。

表 1 模型变迁参数设定

变迁	物理意义	时间/ms
TGap1	数据帧间隔	0.06
TGap2	周期消息间隔	0.006
TGap5	周期消息间隔	0.006
TFrame	光纤网络传输间隔	0.002 148
TFrame1/ TFrame2	交换机处理间隔	0.021 48
TValid1/ TValid2	数据帧间隔	0.06
TInvalid1/ TInvalid2	数据帧传输时限	0.1
Twait	数据帧传输时限	0.1
TStart	周期消息产生间隔	T

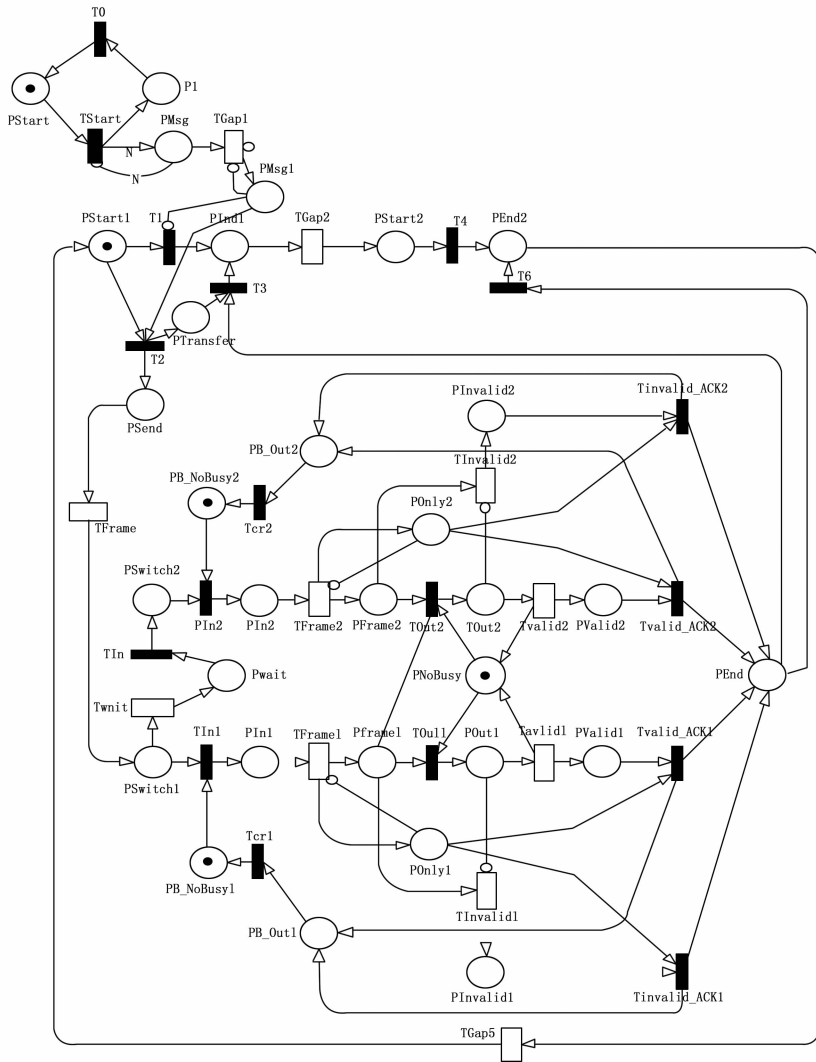


图 3 系统模型

模型中 TStart 为确定时间变迁, 模拟周期性数据, 表示产生周期为 T ms 的周期性消息, 一个周期可以产生 N 条消息。PStart 有标记表示有新的消息要产生, TGap1 为消息传输间隔, 为了防止拥塞, TGap1 中的禁止弧, 确保产生的 N 条周期消息一条一条传输, PMsg1 中有标记表示有周期消息要传输; 当 PStart 有标记, 将通过确定变迁 TStart 的延时变迁以及 T0 的瞬时变迁产生 N 条周期消息, 然后通过变迁 TGap1 每隔一段时间发送一条消息 (禁止弧的存在只能使消息一条一条地传)。此时位置 PMsg1 中有一个标记, 它将抑制变迁 T1 的实施, 若位置 PStart1 中有标记则变迁 T2 将被实施, 即开始周期消息的传输, 并流经交换机处理之。消息传输结束后 PEnd 有标记, T3 变迁可实施, 经过周期消息时间间隔 TGap2, 标记将流入位置 PStart2, 则开始下一条周期消息的传输。

## 3 仿真与性能分析

本文将对模型的两个性能进行分析<sup>[5]</sup>, 即网络负载和系统

表 2 周期消息数目  $N$  变化时的系统性能数据

周期消息数目 $N$ 条数	网络负载	延迟时间 /ms
2	$4.27 \times 10^{-4}$	$7.65 \times 10^{-5}$
4	$8.541 \times 10^{-4}$	$3.062 \times 10^{-4}$
6	0.001 281 1	$6.889 \times 10^{-4}$
8	0.001 708 2	0.001 224 8
10	0.002 135 2	0.001 913 7
12	0.002 562 2	0.002 755 8
14	0.002 989 3	0.003 750 9
16	0.003 416 3	0.004 899 1

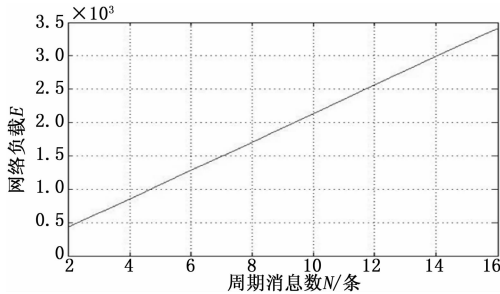


图 4 网络负载 ( $E$ ) 随周期消息数 ( $N$ ) 变化对比图

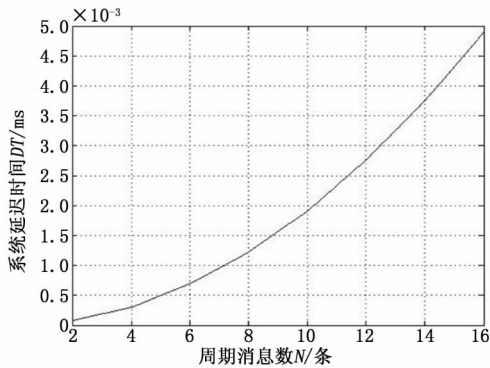


图 5 系统延迟时间 ( $DT$ ) 随周期消息数 ( $N$ ) 变化对比图

2) 当周期消息数目  $N=10$  固定不变, 变化周期间隔时间  $T$  时, 来讨论周期  $T$  对系统性能的影响。仿真数据见表 3, 变化规律如图 6 和图 7 所示。

表 3 周期间隔时间  $T$  变化时的系统性能数据

周期 $T$ /ms	延迟时间 /ms	网络负载	周期 $T$ /ms	延迟时间 /ms	网络负载
2	0.009 345 6	0.010 427 1	16	0.001 198 8	0.001 337 5
4	0.004 741 9	0.005 290 6	18	0.001 066	0.001 189 4
6	0.003 176 9	0.003 544 6	20	$9.597E-4$	0.001 070 8
8	0.002 388 6	0.002 665	30	$6.405E-4$	$7.146E-4$
10	0.001 913 7	0.002 135 2	40	$4.806E-4$	$5.362E-4$
12	0.001 596 4	0.001 781 1	50	$3.846E-4$	$4.291E-4$

从图 6 和图 7 中可以看出, 随着周期间隔时间  $T$  的增大, 网络负载整体上慢慢降低。具体先急剧下降, 后慢慢趋于平缓。因在网络中无其他事件消息时, 周期消息数不变, 周期消息到来的时间间隔越大, 网络越空闲, 负载越低。说明光纤通道完全能够满足通信带宽需求, 系统的延时时间也随周期时间

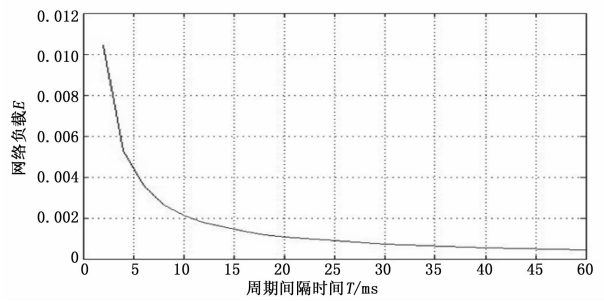


图 6 网络负载 ( $E$ ) 随周期间隔时间 ( $T$ ) 变化的关系图

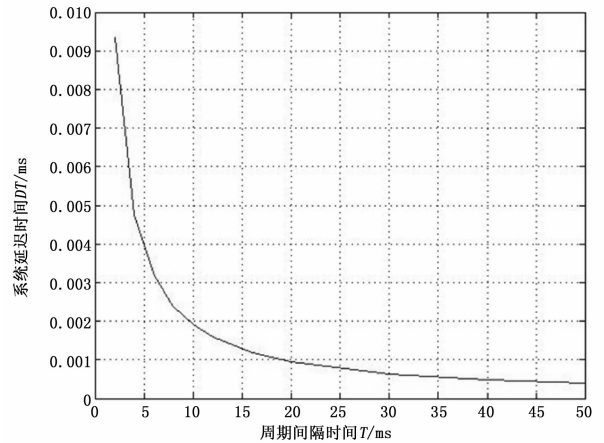


图 7 系统延迟时间 ( $DT$ ) 随周期间隔时间 ( $T$ ) 变化的关系图

急剧下降, 但是其总体保持在微秒级, 能够满足系统对实时性的要求。

#### 4 结束语

新一代航空电子系统从结构上发生了变化, 机载系统资源的共享程度越来越高, 在航空电子网络上传输的不仅仅是数据信息, 而且还有大量的视频、音频信号, 这就要求航空电子通信网络具有更好的实时性、可靠性和可扩展性。FC-AE-ASM 总线网络正是凭借其上述优势成为新一代高性能航空电子网络技术中重要的传输网络。本文利用随机 Petri 网对基于周期消息的 FC-AE-ASM 交换式网络进行了建模, 并对其中的交换机作了详细的建模, 然后对此模型进行了性能分析, 以验证光纤网络的可行性, 可以为新一代航空电子的设计提供技术支撑。

#### 参考文献:

[1] 黄浩益. 光纤通道技术在航电系统中的应用 [J]. 航空电子技术, 2005, 36 (3): 9-24.  
 [2] German R, New results for the analysis of deterministic and stochastic petri net [A]. Computer Performance and Dependability Symposium, 1995. Proceedings [C]. 1995.  
 [3] 吴晨. 总线式弹载控制网络的 DSPN 建模与性能分析 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (8): 1568-1597.  
 [4] 刘斌. 基于 PETRI 网理论的 FC-AE-1553 建模与性能分析 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (9): 2187-2189.  
 [5] 周强. 未来一代军用航空电子系统 [J]. 航空电子技术, 2000: 52-58.