

AFDX 虚拟链路路径实时寻优算法

代真, 何锋*, 张宇静, 熊华钢

北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191

摘要: 航空电子全双工交换式以太网(AFDX)使用虚拟链路(VL)进行消息数据流通信,为提高 AFDX 的网络实时传输性能,以 VL 路径配置寻优为基础,提出了一种基于遗传算法的 AFDX VL 路径优化算法(POGA)。POGA 以提高网络实时性为优化目标,并综合考虑网络负载均衡,以 VL 的路径信息作为染色体,通过遗传算子进行遗传寻优操作,选择促使 AFDX 网络实时性能最优的 VL 路径作为优化结果。利用仿真优化方法对 POGA 进行了实现,在典型 AFDX 网络 1 000 条 VL 的配置下,与负载均衡算法和最短路径算法进行了分析对比,结果显示分别有 76.4% 和 77.4% 的 VL 的传输实时性得到了增强,网络的实时传输性能分别提高了 13.2% 和 12.9%。

关键词: 航空电子全双工交换式以太网; 虚拟链路; 路径配置优化; 遗传算法; 网络性能

中图分类号: V247; TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2015)06-1924-09

航空电子全双工交换式以太网(AFDX)是由 ARINC 664 Part7 定义的航空确定性网络^[1],已经成功应用于空客 A380 和波音 787 飞机中。AFDX 用虚拟链路(VL)对数据流量进行逻辑上的隔离,VL 有效地对带宽资源进行分隔,AFDX 实时性能的保证机制主要体现在 VL 上,VL 路径的配置直接影响网络的传输性能。

在对机载通信网络进行仿真优化^[2]时,常用到智能优化算法^[3],将智能优化算法嵌入到仿真过程中,采用非枚举的形式寻找仿真较优的输入变量值,基于仿真运算决策出最佳结果。遗传算法^[4]是其中最具代表性的一种,已得到广泛应用,如用于动态寻找网络最短路径^[5]、用于动态的负载均衡研究^[6]、用于工业以太网的分区优化研究^[7]以及用于网络的延时评价^[8]等方面。

具体到 AFDX 网络,在 VL 路径配置方面,常采用负载均衡路由^[9]和最小跳数路由^[10]策略;

AFDX 网络实时性优化方面,可对 VL 任务进行控制^[11],利用遗传算法优化 AFDX 网络流量的优先级的设置^[12],或利用轨迹法优化网络传输延时^[13-14]。文献[15]表明 VL 消息的传输延时主要受到经过交换机的跳数和可变延迟(主要为排队延迟)的影响,这就需要对经过交换机的所有 VL 流量的配置进行分析,而对于文献[9]、文献[10]、文献[13]和文献[14]介绍的静态配置 VL 路径的方法,为通过使链路负载均衡或 VL 路径最短等方式间接减小 VL 传输延时的方法,并不能完整地考虑 VL 在实时传输过程中的相互影响,从而存在一些不确定性,并不一定能够得到 VL 的实时最优路径。为减小这种不确定性,可对 VL 路径进行动态优化,直接利用实时平台运行过程中的 VL 延迟作为反馈,选择实时性最好的 VL 配置作为优化结果,即可进一步提升网络性能。由于专用的 AFDX 板卡及交换机价格昂贵,对

收稿日期: 2014-07-16; 退修日期: 2014-09-23; 录用日期: 2014-11-18; 网络出版时间: 2014-11-29 09:01

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20150504.0925.001.html

基金项目: 国家自然科学基金(61301086); 航空科学基金(20131951027)

* 通讯作者. Tel.: 010-82338894 E-mail: robinleo@buaa.edu.cn

引用格式: Dai Z, He F, Zhang Y J, et al. Real-time path optimization algorithm of AFDX virtual link[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 1924-1932. 代真, 何锋, 张宇静, 等. AFDX 虚拟链路路径实时寻优算法[J]. 航空学报, 2015, 36(6): 1924-1932.

AFDX 网络进行设计时常采用仿真的方法,文献[16]利用离散事件建模方法实现了 AFDX 协议的仿真建模,实现了 VL 消息从源节点到目的节点的整个过程的模拟。在 AFDX 仿真模型的基础上,本文以提高网络实时性能为优化目标,并综合考虑网络负载均衡,提出了一种基于遗传算法的 AFDX VL 路径优化算法(POGA),实现了 AFDX 网络的实时仿真优化设计,并利用仿真实验进行分析对比,验证了算法的合理和优越性。

1 AFDX 网络性能参量

图 1 为得到实际航空应用的 AFDX 互连网络^[17],由 8 个交换机($S_1 \sim S_8$)构成互连网络。在评价 AFDX 网络的传输性能时,常用的评价指标主要体现在负载均衡和 VL 消息的传输实时性等方面。

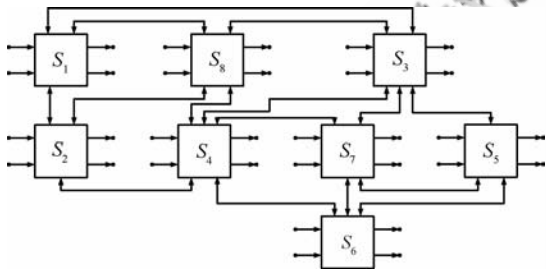


图 1 典型的工业 AFDX 网络

Fig. 1 Typical industry AFDX network

1.1 符号定义

AFDX 网络中,交换机由符号 S_i 表示,如图 1 中的交换机集合为 $\{S_1, S_2, \dots, S_8\}$ 。

AFDX 网络中, VL_i 表示第 i 条虚拟链路,可定义为 $VL_i = (T_{BAG,i}, S_{max,i}, B_{max,VL_i}, k_i, d_i)$,其中: $T_{BAG,i}$ 为 VL_i 消息的带宽分配间隔; $S_{max,i}$ 为 VL_i 的最大包长; B_{max,VL_i} 为 VL_i 的最大允许延迟; k_i 为 VL_i 消息分配的优先级权重,取值为 1~5; d_i 为 VL_i 消息的传输延迟。

POGA 中,若 VL_i 不存在多播,第 x 种可能路径用 $Path_{VL_i}^x$ 表示,对应的编码染色体用 $h_{VL_i}^x$ 表示, $h_{VL_i}^x$ 经交叉、变异产生的新染色体用 h_{new,VL_i}^x 表示;若 VL_i 存在多播,即含有 j 条子虚拟链路 sub-VL,则第 j 条子虚拟链路的第 x 种可能路径用 $Path_{VL_i-sub_j}^x$ 表示,对应的编码染色体用 $h_{VL_i-sub_j}^x$

表示,经交叉、变异产生的新染色体用 $h_{new,VL_i-sub_j}^x$ 表示。交叉概率和变异概率分别用 g_c 和 g_m 表示。遗传算法的种群规模定为 N_m ,上一代种群用 G_{n-1} 表示,在此基础上进行交换和变异后的群体用 V_n 表示,当代种群用 G_n 表示。

1.2 链路负载率

负载均衡体现在链路负载率上,链路负载率定义为单位时间内,物理链路传输数据所占用的时间与单位时间的比值。AFDX 网络中,对给定 VL 配置的物理链路 $Link_j$,该物理链路上共含有 n 条 VL,分别为 $\{VL_1, VL_2, \dots, VL_n\}$,最大包长和带宽分配间隔分别为 $S_{max,i}$ 和 $T_{BAG,i}$,则 $Link_j$ 的负载率为

$$U_{Link_j} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_{max,i} \times 8}{T_{BAG,i}} \right) / C$$

式中: C 为物理链路的带宽。

若 AFDX 网络中共有 M 条物理链路,则网络最大的物理链路负载率为

$$U_{max} = \max_{j \in M} (U_{Link_j})$$

1.3 消息传输实时性

消息的实时性体现在传输延迟上,传输延迟越小,实时性能越强。传输延迟定义为消息从源位置出发,经过物理链路和交换机传播,到达目的位置的整个过程所经历的时间,代表了网络实际提供给使用者的通信延迟性能。

对于含有 N 条 VL 的 AFDX 互连网络,可定义消息的传输延时时间率为传输延时 d_i 与传输界限值 B_{max,VL_i} 的比值,即 $d_i / B_{max,VL_i}$;将优先级权重 k_i 与传输延迟时间率的乘积作为该条 VL_i 消息在网络中的传输延时性能影响因子,对所有 VL_i 的传输延时影响因子求和,可以得到 AFDX 整网的传输延时性能因子为

$$D = \sum_{i=1}^N k_i \times \frac{d_i}{B_{max,VL_i}}$$

2 典型 VL 路径配置算法

2.1 负载均衡算法

负载均衡(Load Balance, LB)算法旨在选择使网络链路负载均衡化的路由配置方式^[9],广泛

应用于多协议标签交换 (Multi-Protocol Label Switching, MPLS)、Ad hoc 和 AFDX 等网络的路由配置中^[13,18]。若 AFDX 网络共含有 M 条物理链路, 其中每条物理链路的负载率为 U_{Link_j} , 则网络链路平均负载率 $\bar{U} = \left(\sum_{j=1}^M U_{Link_j} \right) / M$, 则负载

率均方差为 $\delta_U = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^M (U_{Link_j} - \bar{U})^2 \right) / M}$ 。通常负载均衡算法可定义为网络的 δ_U 值最小。

2.2 最短路经算法

最短路经 (Shortest Path, SP) 算法旨在寻找消息从源节点到目的节点跳数最小的路由配置策略^[10,13]。AFDX 网络中, 最短路经算法即使所有 VL 经过的交换机跳数最小。最短路经算法中得到最广泛应用的是迪杰斯特拉 (Dijkstra) 算法^[19], Dijkstra 算法用于计算寻找网络中一个节点到其他所有节点之间的最短路经。

3 POGA

POGA 以 VL 路径选择为基础, 提高网络消息传输实时性为目标, 其实施过程如下。

步骤 1 对研究对象进行编码, 形成遗传个体, 并随机建立初始群体, 为多个编码的集合。

步骤 2 计算群体的个体适应度函数值, 得到个体代表的网络传输性能。

步骤 3 执行遗传算子 (交叉、变异和选择) 产生新群体的操作。

步骤 4 根据预制的条件判断计算过程是否可以结束, 如果不满足结束条件则返回步骤 2, 直到结束条件为止。

下面以图 1 所示的典型工业 AFDX 网络为基础, 具体说明 POGA 的工作步骤。

3.1 POGA 编码

对于 AFDX 路径优化问题, 每一个体代表所有需要优化的 VL 从源交换机到目的交换机的路径, 由于需要优化的每条 VL 路径经过的交换机数目是不确定的, 这里采用变长二维编码方式。

基因用交换机编号表示, 如交换机 S_3 编码为 3, 染色体则为由一串由交换机编号组成的数列。将 VL 分为单播和多播 2 种情况进行编码。

1) VL_i 单播, 如 VL_i 的一条可能路径为 $Path_{VL_i}^1 = S_1 - S_2 - S_4 - S_6$, 则其对应的路径编码染色体 $h_{VL_i}^1 = 1 - 2 - 4 - 6$, 如图 2 所示。代表同一 VL 路径的每条染色体的第 1 个基因和最后 1 个基因都一样, 分别是源交换机和目的交换机的编号。并且染色体中不能出现重复的基因, 染色体的最大长度为交换机的总数。

2) VL_i 多播 (存在 sub-VL 的情况), 包含多个目的节点, 若只用一条染色体表示该 VL 的路径则得不到正确的结果, 为解决这个问题, 可将每条子 VL 视为一条路径进行编码。如 VL_i 的第 1 条子虚拟链路的一条路径编码可以表示为 $h_{VL_i, sub}^1 = 1 - 2 - 4 - 6$ 。

所有路径编码的集合构成了 POGA 的遗传个体, 如图 2 所示。

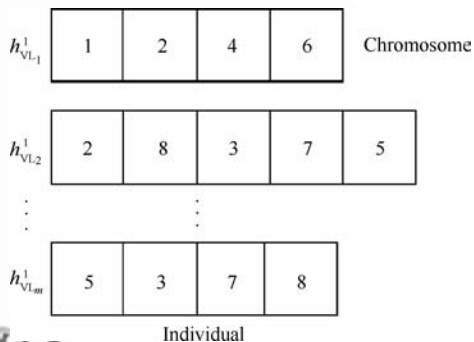


图 2 虚拟链路 (VL) 路径编码示例

Fig. 2 Example of virtual link (VL) path encoding

3.2 POGA 初始化种群

POGA 在路径优化过程中会产生不可行解, 若初始种群中含大量不可行解, 将不利于遗传算法的寻优, 导致无法找到最优解。产生不可行解的原因主要有:

1) 路径存在回路, 如路径 $\{S_1 - S_3 - S_5 - S_7 - S_3 - S_4\}$ 。

2) 不存在相应的物理链路, 如路径 $\{S_1 - S_3 - S_6 - S_7\}$, 在交换机 S_3 和 S_6 之间没有对应的物理链路。

解决方案如图 3 所示:

1) 路径生成过程中若出现重复的交换机编号, 则重新生成下一节点的交换机编号。

2) 任意交换机的下一节点需从与其有物理

链路连接的交换机中选择。

3) 若无法生成满足上述条件的下一节点,则从源交换机开始重新生成路径,直到生成一条满足要求的可行解。

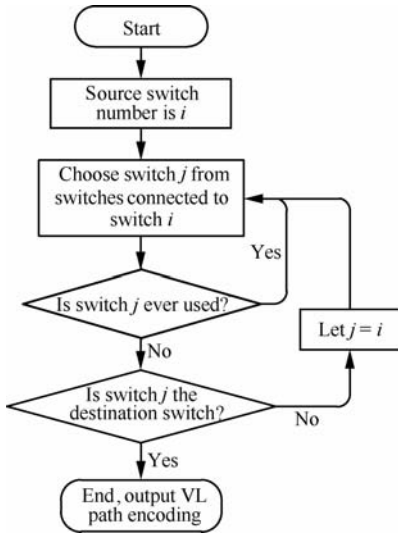


图3 VL 路径初始化过程

Fig. 3 Process of VL path initialization

初始种群的规模 N_m 定为需要优化的 VL 数目的 3 倍,并且种群规模不小于 5,且不超过 30。

3.3 POGA 适应度函数

POGA 综合考虑消息传输实时性和物理链路负载率对 AFDX 网络传输性能的影响,将适应度函数值定为

$$\text{Fitness} = a \times D + (1 - a) \times \delta_U$$

式中: a 为延时权重,取值范围为 $[0, 1]$,由于侧重考虑网络实时性,本文中 a 取值为 0.9; D 为传输延时性能因子,VL 消息的传输延时由仿真时通过基本网络演算计算^[15,20]获得;适应度函数值越小,个体越优。

3.4 POGA 的遗传操作

POGA 的遗传操作如表 1 所示,介绍了在遗传过程中,上一代种群怎样经过交叉、变异以及选择等操作获得当代种群的过程。

3.4.1 POGA 选择

POGA 采用跨世代精英选择策略,即将上世代种群和通过交叉变异产生的新种群进行混合,

再从中选取较优个体形成新的群体。将上一代种群 G_{n-1} 和经交换和变异后的群体 V_n 混合,再从中选择 N_m 个较优个体构成当代种群 G_n 。

表 1 POGA 的遗传操作

Table 1 Genetic operations of POGA

Step 1. $G_{n-1} = \{h_{VL_i}^1, h_{VL_i}^2, \dots, h_{VL_i}^{N_m}\}$

Step 2. Crossover: choose $h_{VL_i}^j$ and $h_{VL_i}^k$ with g_c

if $h_{VL_i}^j$ and $h_{VL_i}^k$ have one common gene v

$$h_{VL_i}^j = s \xrightarrow{j} v \xrightarrow{j} r \text{ and } h_{VL_i}^k = s \xrightarrow{k} v \xrightarrow{k} r$$

$$\Rightarrow h_{VL_i}^{j, \text{new}} = s \xrightarrow{j} v \xrightarrow{k} r \text{ and } h_{VL_i}^{k, \text{new}} = s \xrightarrow{k} v \xrightarrow{j} r$$

else u and v is middle gene of $h_{VL_i}^j$ and $h_{VL_i}^k$

$$h_{VL_i}^j = s \xrightarrow{j} u \xrightarrow{j} r \text{ and } h_{VL_i}^k = s \xrightarrow{k} v \xrightarrow{k} r$$

$$\Rightarrow h_{VL_i}^{j, \text{new}} = s \xrightarrow{j} v \xrightarrow{k} r \text{ and } h_{VL_i}^{k, \text{new}} = s \xrightarrow{k} u \xrightarrow{j} r$$

Step 3. Mutation: choose $h_{VL_i}^q$ with g_m

$$h_{VL_i}^q = s \xrightarrow{v} r \text{ and } v \text{ as mutation point}$$

$$\Rightarrow h_{VL_i}^{q, \text{new}} = s \xrightarrow{u} r, v \text{ mutated into } u$$

Step 4. $V_n = \{h_{VL_i}^{1, \text{new}}, h_{VL_i}^{2, \text{new}}, \dots, h_{VL_i}^{N_m, \text{new}}\}$

Step 5. $G_n = \text{choose } N_m \text{ best individuals from } G_{n-1} + V_n$

计算所有个体的适应度函数值,不同路径的适应值差异较大,为保证种群的多样性,POGA 在选择时按照适应度函数的值将种群中的所有个体按照从大到小排序,记下每个个体的新序号,并将新序号作为个体的适应值,然后按照轮盘赌选择的方法依概率选择下一代个体。

3.4.2 POGA 交叉

使用单点交叉方式,选择交叉点,交换配对染色体交叉点之后的部分,生成的 2 个新个体加入下一代种群中。如图 4 所示,POGA 交叉分为 2 种情况:

1) 交叉点选在公共交换机处(源交换机和目的交换机除外),若存在多个公共交换机,则随机选择一个作为交叉点。如染色体编码 $h_{VL_i}^1 = 1-2-4-6$ 和染色体 $h_{VL_i}^2 = 1-3-4-7-6$ 进行交叉,选择 4 作为交叉点,得到的新个体为 $h_{VL_i}^{1, \text{new}} = 1-2-4-7-6$ 和 $h_{VL_i}^{2, \text{new}} = 1-3-4-6$ 。

2) 若不存在公共交换机,则选择中间点处进行交叉。如 $h_{VL_i}^1 = 5-3-1-8$ 和染色体 $h_{VL_i}^2 = 5-6-4-2-8$ 进行交叉,得到的新个体为 $h_{VL_i}^{1, \text{new}} = 5-3-4-2-8$ 和 $h_{VL_i}^{2, \text{new}} = 5-6-1-8$ 。

$=5-3-4-2-8$ 和 $h_{\text{new}, \text{VL}_m}^2 = 5-6-1-8$ 。

若交叉后染色体中出现重复基因,则随机删除一个,消除回路。如染色体 $h_{\text{VL}_2}^1 = 2-8-3-7-4$ 和 $h_{\text{VL}_2}^2 = 2-1-3-8-4$ 选择 8 作为交叉点,新染色体分别为 $h_{\text{new}, \text{VL}_2}^1 = 2-8-4$ 和 $h_{\text{new}, \text{VL}_2}^2 = 2-1-3-8-3-7-4$, $h_{\text{new}, \text{VL}_2}^2$ 中 3 重复出现,删去前一个,则变为 $h_{\text{new}, \text{VL}_2}^2 = 2-1-8-3-7-4$ 。

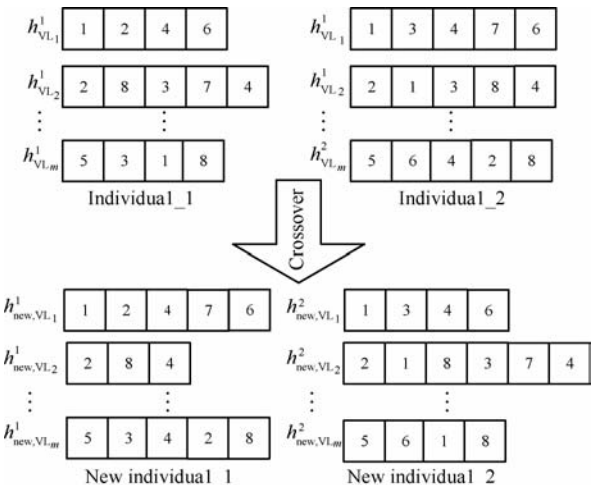


图 4 交叉操作示例

Fig. 4 Example of crossover operation

若经交叉后的路径为不可行解,即不存在对应路径,此时该染色体不变,应保持父染色体状态,如上染色体 $h_{\text{new}, \text{VL}_2}^2 = 2-1-3-8-3-7-4$ 若删去后一个重复的基因 3,则变为 $h_{\text{new}, \text{VL}_2}^2 = 2-1-3-8-7-4$,而交换机 8 和 7 之间不存在物理链路,该染色体不可行,此时应否决交叉,保持为 $h_{\text{new}, \text{VL}_2}^2 = 2-1-3-8-4$ 。

3.4.3 POGA 变异

使用单点变异的方式,若一条路径同时改变多个交换机,不利于局部搜索。如图 5 所示,POGA 变异分为 2 种情况:

1) 为了减少不可行解的出现,变异时从与变异点前一基因相连的交换机集合中随机选择一个染色体中没有出现过的交换机替换变异点上的基因。染色体 $h_{\text{VL}_1}^1 = 1-8-3-4$ 中选 3 作为变异点,3 的前一基因为 8,若与交换机 8 相连的交换机集合为 $\{1, 2, 3, 4\}$,选择 2 替换 3,则新染色体为 $h_{\text{new}, \text{VL}_1}^1 = 1-8-2-4$,若选择 1 替换 2,染色体变异为 $h_{\text{new}, \text{VL}_1}^1 = 1-8-1-4$,删去重复交换机,

则变为 $h_{\text{new}, \text{VL}_1}^1 = 1-8-4$ 。

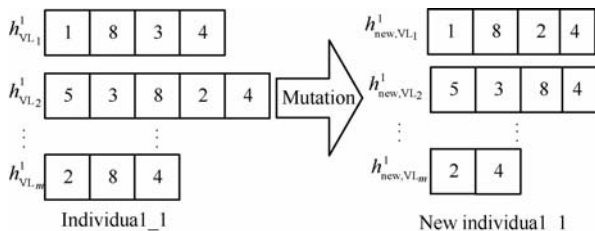


图 5 变异操作示例

Fig. 5 Example of mutation operation

2) 有一种染色体只含 2 个基因,即源交换机和目的交换机,如果初始种群中,不含这种染色体,以上交叉和变异操作也不会产生这种染色体,而这种染色体很有可能是最优解。这里在随机选择变异点之后,不一定要改变基因,也可以直接删除基因。如:染色体 $h_{\text{VL}_m}^1 = 2-8-4$ 中选 8 为变异点,删除基因 8,则新染色体为 $h_{\text{new}, \text{VL}_m}^1 = 2-4$ 。

若变异后的路径是不可行解,即新染色体路径不可达,此时,应否决该变异,染色体保持父本的染色体状态。

3.5 POGA 终止条件

适应度函数值越小,个体越优。在 POGA 算法中,当最优个体的适应度在 5 代以内已经不再上升时,或者迭代次数达到预设的 2 000 代时,终止遗传,选出最优个体,解码得出结果。

4 实例分析

利用 C++ 构建 AFDX 网络模型,成功完成对 AFDX 协议的仿真。在此基础上对 VL 路径的分配算法,分别实现了负载均衡、最短路径以及 POGA 算法,下面利用仿真实验进行比较。

4.1 AFDX 模型验证

文献[16]介绍了利用网络演算方法验证 AFDX 模型的方法,本文将采用文献[14]中介绍的一个典型的最简 AFDX 网络对仿真模型进行验证。如图 6 所示, $e_1 \sim e_7$ 表示端系统,虚拟链路 $\text{VL}_1 \sim \text{VL}_5$ 的最大包长 $S_{\text{max}} = 4\ 000$ bits, $T_{\text{BAG}} = 4\ 000\ \mu\text{s}$ 。

由网络演算^[14-15]可知,AFDX 中每条 VL 的到达曲线均可表示为 $\alpha_i = S_{\text{max}, i} + S_{\text{max}, i} / T_{\text{BAG}, i}$,交

换机的服务曲线均可表示为 $\beta_{R,T}=R[t-T]^+$, 这里 $R=100\text{ Mb/s}$ 为端口速率, $T=16\text{ }\mu\text{s}$ 为交换机技术延迟, $[t-T]^+$ 表示当 $t-T\geq 0$ 时, $[t-T]^+$ 取值为 $t-T$, 其他情况下取值为 0。VL 经过交换机端口的最大延迟, 为经过该端口的所有 VL 到达曲线之和 $\alpha_{\text{all}}=\sum\alpha_i$ 与服务曲线 $\beta_{R,T}$ 的横向最大距离。

利用仿真模型得到的实时仿真最大延迟结果如表 2 中 D_SIM 列所示; 仿真模型利用网络演算计算得到的延迟上界如表 2 中 D_UPP 列所示; 依据网络演算理论计算获得的延时结果如表 2 中 D_NET 列所示。

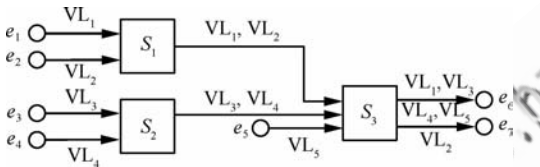


图 6 最简 AFDX 拓扑
Fig. 6 Simplest AFDX topology

表 2 VL 延迟上界

Table 2 Latency upper bounds of VL

VL _i	D_SIM/ μs	D_UPP/ μs	D_NET/ μs
1	271.9	313.2	313.2
2	192.2	192.4	192.4
3	271.9	313.2	313.2
4	271.9	313.2	313.2
5	176.8	217.2	217.2

由表 2 可见, 经过仿真模型仿真获得的最大延迟均在网络演算计算得到的延迟界限以内, 且只有少量的最大延迟接近延迟界限, 并且仿真模型利用网络演算计算的延迟界限值和理论计算的延迟界限值相同, 据此, 仿真模型的精确度得到了网络演算方法的验证。

4.2 实验 1

以图 1 所示网络为例, 简化网络配置说明 POGA 的工作过程。设端系统 ES_1, ES_2, \dots, ES_8 分别与交换机 S_1, S_2, \dots, S_8 相连, 网络中共有 7 条 VL, 源节点分别为 $ES_1, ES_2, ES_3, ES_4, ES_5, ES_7$ 和 ES_8 , 目的节点均为 ES_6 。所有 VL 的最大包长 $S_{\text{max}}=4\text{ }000\text{ bits}$, $T_{\text{BAG}}=4\text{ }000\text{ }\mu\text{s}$, 消息传输界限

值为 1 ms , 优先级均为 1, 网络链路传输速率定为 100 Mb/s , 交换机技术时延为 $16\text{ }\mu\text{s}$ 。利用基本网络演算计算消息从端系统发送端到达接收端的传输延时。

利用负载均衡原则配置 $VL_1\sim VL_7$ 路径, 配置得到的路径信息分别为: $\{S_1-S_2-S_4-S_6\}$, $\{S_2-S_4-S_6\}$, $\{S_3-S_7-S_6\}$, $\{S_4-S_6\}$, $\{S_5-S_6\}$, $\{S_7-S_6\}$, $\{S_8-S_3-S_5-S_6\}$ 。利用网络演算获得的延迟大小如表 3 中 LB 列所示, 适应度函数值为 $F_{\text{LB}}=3.666$ 。

由最短路径算法得到的 VL 配置路径为: $\{S_1-S_2-S_4-S_6\}$, $\{S_2-S_4-S_6\}$, $\{S_3-S_7-S_6\}$, $\{S_4-S_6\}$, $\{S_5-S_6\}$, $\{S_7-S_6\}$, $\{S_8-S_4-S_6\}$, 利用网络演算计算得到的延迟大小如表 3 中 SP 列所示, 适应度函数值为 $F_{\text{SP}}=3.782$ 。

利用本文的 POGA 对经过负载均衡配置路径后的网络进行优化, 若仅对单条 VL 进行优化, 这里对 VL_1 的路径信息进行优化, 则 VL_1 经优化后的路径为 $\{S_1-S_3-S_4-S_6\}$, 延迟大小如表 3 中 POGA_O 列所示, 适应度函数值 $F_{\text{POGA}_O}=3.578$ 。

利用 POGA 对经负载均衡或最短路径算法配置的整个网络 VL 的路径进行优化, 优化后得到的路径配置结果分别为 $\{S_1-S_3-S_7-S_6\}$, $\{S_2-S_4-S_6\}$, $\{S_3-S_5-S_6\}$, $\{S_4-S_6\}$, $\{S_5-S_6\}$, $\{S_7-S_6\}$, $\{S_8-S_4-S_6\}$, 此时延时结果如表 3 中 POGA_W 列所示, 适应度函数值为 $F_{\text{POGA}_W}=3.522$ 。

图 7 为以上 4 种网络路径配置的延时结果, 其中 LB 和 SP 分别为经负载均衡和最短路径算法配置路径得到的延时结果, POGA_O 和 POGA_W 分别为优化单条 VL 和优化整个网络 VL 后的延时

表 3 VL 延时结果

Table 3 Latency results of VL

VL _i	LB/ μs	SP/ μs	POGA_O/ μs	POGA_W/ μs
1	629.6	671.2	588	548
2	573.6	615.2	532	532
3	492.8	494.4	492	492
4	477.6	519.2	476	476
5	436.8	398.4	436	436
6	436.8	438.4	436	436
7	548.8	575.2	548	532

结果。经过 POGA 优化单条或整个网络的 VL 路径后,与负载均衡配置的网络相比,VL 消息的传输延时均有下降;和最短路径算法配置的网络相比,除极少数 VL 外,VL 的传输延时得到了极大的优化。4 种配置下的适应度函数值的关系为: $F_{SP} > F_{LB} > F_{POGA_O} > F_{POGA_W}$,即经 POGA 优化后的网络,适应度函数值得到了减小,网络的性能得到了增强。

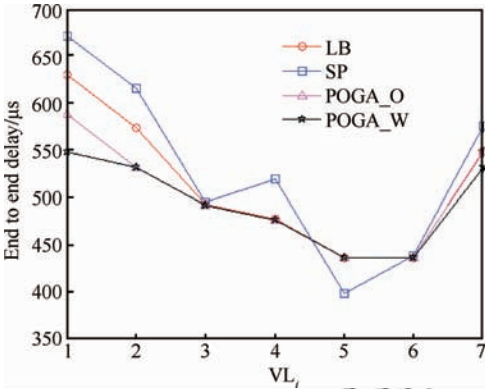


图 7 4 种 VL 路径配置下的延时结果
Fig. 7 Latency results under four VL path configurations

4.3 实验 2

在如图 1 所示的网络中,配置 1 000 条 VL,表 4 为 VL 的配置信息。对该配置的网络分别利用负载均衡算法、最短路径算法和 POGA 进行 VL 路径配置或优化。并利用基本网络演算计算各自的 VL 延时上限结果。

表 4 VL 配置信息 Table 4 Configuration information of VL				
VL_i	$T_{BAG,i}/ms$	$S_{max,i}/byte$	$B_{max,VL_i}/ms$	k_i
1-50	2	217	20	1
51-150	4	367	20	1
151-350	8	667	20	2
351-550	16	967	20	3
551-750	32	1 267	20	4
751-950	64	1 538	20	5
951-1 000	128	1 538	20	1

经过负载均衡算法和最短路径算法配置网络得到的适应度函数值分别为 $F_{LB} = 2\,264.1$ 和 $F_{SP} = 2\,256.5$,利用 POGA 进行整网 VL 路径优

化后得到最优的适应度函数值为 $F_{POGA} = 1\,965$ 。即 $F_{LB} > F_{SP} > F_{POGA}$,可见 POGA 提高了网络的实时传输性能。

将 T_{BAG} 相等的 VL 的传输延时取平均值,得到的结果如图 8 所示,在所有 1 000 条 VL 中,将经过 POGA 优化 VL 后的网络与经 LB 或 SP 配置的网络相比,分别有 76.4%和 77.4%的 VL 的传输延时得到了减小,延时性能得到了提升。

如图 8 所示, T_{BAG} 为 2~64 的 VL 的平均延时得到了极大的提升。从网络整体实时性结果看,POGA 相较于负载均衡(LB)和最短路径(SP)算法,分别有 13.2%和 12.9%的提升。

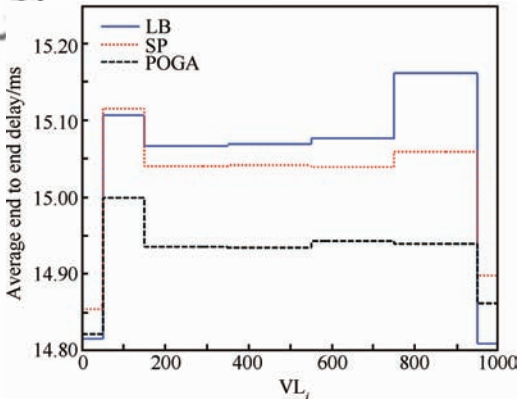


图 8 VL 平均延时
Fig. 8 Average latency results of VL

由于负载均衡算法为使链路负载均衡,部分 VL 选择的不是最短的路径,导致网络延时增加。而最短路径算法使所有 VL 选择最短路径,未考虑 VL 消息在实时传输过程之中经过交换机时的交叉干扰,可能导致在局部地方造成阻塞现象,导致延时增加。

POGA 以 VL 消息的传输延迟上界为优化反馈,而 VL 的延迟上界是通过仿真模型利用网络演算方式计算的,VL 经过交换机端口的最大延迟,为经过该交换机端口的所有 VL 达曲线之和 $\alpha_{all} = \sum \alpha_i$ 与服务曲线 $\beta_{R,T}$ 的横向最大距离,其中所有 VL 的到达函数均代表了对应 VL 的相应信息,从而 POGA 通过仿真成功模拟了 AFDX 在运行时态下 VL 经过交换机端口时相互之间的交叉影响,在兼顾网络链路负载均衡的同时,动态搜索使网络延时性能最好的 VL 路径配置信息,

© 航空学报编辑部 <http://hkxb.buaa.edu.cn>

能够得到更优的 VL 路径配置结果。

5 结 论

1) 为动态提升 AFDX 网络消息传输的实时性能,本文提出了一种基于遗传算法的 AFDX 虚拟链路(VL)路径优化算法(POGA)。POGA 通过仿真,模拟 AFDX 实时通信,将 VL 消息的延迟结果作为反馈信息,在原有 VL 路径配置的基础上,对 VL 路径进行仿真动态优化,搜索实现网络实时传输性能最大化的 VL 路径配置信息。

2) POGA 通过计算机仿真实现,获得的优化结果 VL 路径配置信息可直接对实际应用的 AFDX 板卡及交换机进行配置,而不会对 AFDX 板卡或交换机产生额外的计算量。

3) 本文用计算机仿真实验验证了 POGA 的有效性,将 POGA 与负载均衡算法和最短路径算法进行了比较分析。结果表明,在典型的 AFDX 网络配置下,与负载均衡或最短路径算法相比较,POGA 分别使网络的实时性能提升了 13.2% 和 12.9%。

参 考 文 献

- [1] ARINC. Aircraft data network, Part 7: Avionics full duplex switched ethernet (AFDX) network[S]. Annapolis: Aeronautical Radio, 2005: 9-18.
- [2] Yang X L, Wang F, Feng Y C. The review of simulation optimization theory and techniques[J]. Computer Simulation, 2000, 17(5): 1-5 (in Chinese).
杨湘龙, 王飞, 冯允成. 仿真优化理论与方法综述[J]. 计算机仿真, 2000, 17(5): 1-5.
- [3] Qiu Z P, Zhang Y X. Application of intelligent optimization algorithm on aircraft configuration design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(1): 62-67 (in Chinese).
邱志平, 张宇星. 智能优化算法在飞机总体设计中的应用[J]. 航空学报, 2009, 30(1): 62-67.
- [4] Handbook of genetic algorithms[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991: 1-99, 124-166.
- [5] Yang S, Cheng H, Wang F. Genetic algorithms with immigrants and memory schemes for dynamic shortest path routing problems in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2010, 40(1): 52-63.
- [6] Zomaya A Y, Teh Y H. Observations on using genetic algorithms for dynamic load-balancing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2001, 12(9): 899-911.
- [7] Carro-Calvo L, Salcedo-Sanz S, Portilla-Figueras J A, et al. A genetic algorithm with switch-device encoding for optimal partition of switched industrial Ethernet networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2010, 33(4): 375-382.
- [8] Addad B, Amari S, Lesage J J. Genetic algorithms for delays evaluation in networked automation systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011, 24(3): 485-490.
- [9] Wang Z, Crowcroft J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1228-1234.
- [10] Apostolopoulos G, Williams D, Kamat S, et al. QoS routing mechanisms and OSPF extensions[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997: 1903-1908.
- [11] Zhou Q, Qu Z, Lin H. Admission control of VL in AFDX under HRT constraints[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(2): 195-201.
- [12] Frances F, Fraboul C, Grieu J. Using network calculus to optimize the AFDX network[C]//2006 3rd European Congress ERTS Embedded Real-time Software, 2006.
- [13] Liu C, Li H, He F, et al. Routing algorithm of AFDX network based on trajectory approach [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(12): 1587-1590 (in Chinese).
刘成, 李航, 何锋, 等. 基于轨迹方法的 AFDX 网络路由配置算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(12): 1587-1590.
- [14] Bauer H, Scharbag J, Fraboul C. Improving the worst-case delay analysis of an AFDX network using an optimized trajectory approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2010, 6(4): 521-533.
- [15] Yang Y, Xiong H G. A method for bounding AFDX frame delays by network calculus[J]. Electronics & Control, 2008, 15(9): 57-60 (in Chinese).
杨云, 熊华钢. 计算 AFDX 延迟的网络演算方法[J]. 电光与控制, 2008, 15(9): 57-60.
- [16] Huang Z, Zhang Y T, Xiong H G. AFDX modeling and simulation based on discrete event method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(10): 1326-1332(in Chinese).
黄臻, 张勇涛, 熊华钢. 基于离散事件方法的 AFDX 建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(10): 1326-1332.
- [17] Charara H, Scharbag J, Ermont J, et al. Methods for

- bounding end-to-end delays on an AFDX network[C]// 2006 IEEE 18th Euromicro Conference on Real-Time Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 202.
- [18] Pham P P, Perreau S. Performance analysis of reactive shortest path and multipath routing mechanism with load balance[C]//2003 Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003: 251-259.
- [19] Li Y C, Liu W Q. Analysis of the shortest route in network on Dijkstra algorithm[J]. Microcomputer Application, 2004, 25(3), 295-298 (in Chinese).
李元臣, 刘维群. 基于 Dijkstra 算法的网络最短路径分析[J]. 微计算机应用, 2004, 25(3): 295-298.
- [20] Le Boudec J Y, Thiran P. Network calculus: a theory of deterministic queueing systems for the internet[M]. Berlin: Springer, 2001: 7-24, 122-125, 175-180.

作者简介:

代真 男, 硕士研究生。主要研究方向: 机载网络。

Tel: 010-82338712

E-mail: daizhen@buaa.edu.cn

何锋 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 航空电子综合, 实时调度、实时网络。

Tel: 010-82338894

E-mail: robinleo@buaa.edu.cn

张宇静 女, 硕士研究生。主要研究方向: 机载网络。

E-mail: zhangyujing327@gmail.com

熊华钢 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 航空电子综合、机载网络。

Tel: 010-82317202

E-mail: hgxb@ee.buaa.edu.cn

Real-time path optimization algorithm of AFDX virtual link

DAI Zhen, HE Feng^{*}, ZHANG Yujing, XIONG Huagang

School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: Avionics full duplex switched ethernet (AFDX) uses virtual link (VL) for message communications. In order to improve the real-time transmission performance of AFDX networks, with the target of VL path configuration optimization, a virtual link path optimization algorithm based on genetic algorithm (POGA) is proposed. In POGA, the network's real-time transmission performance is used as optimization objectives, and the network load balancing has also been considered. With VL path used as chromosome, POGA works through genetic operation and tries to find out the optimal VL path solution which makes the AFDX's real-time network performance the best. POGA is implemented by simulation. Under a configuration of 1 000 VLs of a typical AFDX network, POGA is compared with the load balancing algorithm and the shortest path algorithm, and results show that 76.4% and 77.4% of VLs' real-time transmission latency has been reduced, and the real-time transmission performance of the AFDX network is enhanced by 13.2% and 12.9% respectively.

Key words: AFDX; virtual link; path configuration optimization; genetic algorithms; network performance

Received: 2014-07-16; **Revised:** 2014-09-23; **Accepted:** 2014-11-18; **Published online:** 2014-11-29 09:01

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20150504.0925.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61301086); Aeronautical Science Foundation of China (20131951027)

*** Corresponding author.** Tel.: 010-82338894 E-mail: robinleo@buaa.edu.cn