

## SpaceWire 总线的双路由单元性能评价方法\*

闫梦婷<sup>1,2</sup>, 安军社<sup>1</sup>, 龚泉铭<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190)

**摘要:**基于双路由单元研究了 SpaceWire 总线的性能评价体系。研究中给出双路由单元的定义, 推导基于双路由单元的路由系统的数据传输时间和资源耗费的计算方法; 推导基于双路由单元的多路由拓扑系统的性能评价体系; 采用蒙特卡洛模拟的方法建立双路由单元系统的模拟平台, 仿真计算路由单元在不同接口配置情况下的性能。研究结果表明: 基于双路由单元的传输时间和资源耗费指标能够评价 SpaceWire 总线的性能; 在不同接口配置时, 存在一种最佳的配置方式使系统的性能达到最优。

**关键词:**SpaceWire; 双路由单元; 自适应群组路由; 性能评价

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)01-086-06

## Performance evaluation method for dual-route unit based on SpaceWire bus

YAN Mengting<sup>1,2</sup>, AN Junshe<sup>1</sup>, GONG Quanming<sup>1,2</sup>

(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The performance evaluation system of SpaceWire bus based on dual-route unit was studied. The definition of dual-route unit was given and the computation method of data transmission time and resource consumption of the route system based on dual-route unit was derived during the study. The performance evaluation system of multi-route topological system based on dual-route unit was derived; the simulation platform of dual-route unit system was built by using the Monte-Carlo method, and the performances of route unit with different interface configurations were simulated. Study results show that the performance of SpaceWire bus can be evaluated through using the transmission time and resource consumption indexes based on dual-route units, and also that an aimed configuration exists such that the system performance can be optimized to the best when different interface configurations are considered.

**Key words:** SpaceWire; double-router cell; group adaptive routing; performance evaluation

SpaceWire 是欧空局 (European Space Agency, ESA) 等国际学术机构共同制定并不断迭代的新一代星载高速数据总线标准<sup>[1]</sup>, 由于其具有高速、简单灵活和协议开放等特点, 并且提供了一种统一的用来连接传感器、数据处理单元、大容量存储器的串行总线基础架构, 已经成功应用于多个国际空间任务<sup>[2-3]</sup>, 如: 在 Gaia 电子系统中, SpaceWire 作为连接光学传感器、有效载荷数据处理单元、控制与数据管理单元的高速数据总线被大量使用<sup>[4]</sup>; Swift 卫星中  $\gamma$  射线探测器使用了 16 条 SpaceWire 链路将科学数据与工程参数传输至冗余的电子图像处理单元中<sup>[5]</sup>。

SpaceWire 自提出以来, 作为一个开放式协议标准, 各国研究机构仍在不断探索和研究, 主要包

含以下 3 个方面<sup>[6-8]</sup>: ①对总线通信协议的研究; ②对总线硬件实现方式的研究; ③对通信网络链路组成及路由机制的研究。其中, 前两方面是 SpaceWire 总线最基础的内容, 而第三方面则是对总线性能的优化, 尤其是对路由机制的研究。文献[7]对 SpaceWire 总线路由器的路由更新策略进行改进, 引入了链路状态路由算法, 改善了网络的数据传输效率; 文献[9]研究了 SpaceWire 网络中的高实时性消息的确定性端到端传输延时, 提出了一种基于 SpaceWire 组路由特点的网络重构方案; 文献[10]对某特定应用场景下的 SpaceWire 路由的延时抖动进行了定量分析和研究。然而这些研究均未对总线的路由拓扑结构及其性能评价体系进行研究。

\* 收稿日期: 2015-08-13

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目 (XDA04060300)

作者简介: 闫梦婷 (1989—), 女, 广西桂林人, 助理研究员, 博士, E-mail: yanmengting0101@163.com

# 1 SpaceWire 自适应群组路由机制

SpaceWire 路由器由编解码器和路由单元两个部分组成,如图 1 所示。其中,编解码器根据传输层协议识别源节点中待传数据的长度、目标地址等信息组织数据包包头,并将待传数据和包头转化为 SpaceWire 协议信号层和字符层定义的 DS(data strobe)信号和数据字符格式,或者执行解码操作;路由单元则实现了数据传输的路由,路由单元的每一个接口都有一个编解码器,编解码器衔接路由控制器和对外接口。当路由单元接收到数据包,读取数据包包头,识别数据包的目标地址,分配路由网络中可用的传输路径,实现数据包的准确传输。路由器通常由 1 个或多个路由单元以某种拓扑结构互联组成,使用不同的拓扑结构所耗费的传输时间和硬件资源会有很大差别,因此有必要研究 SpaceWire 总线的自适应群组路由 (group adaptive routing) 机制的性能评价体系。

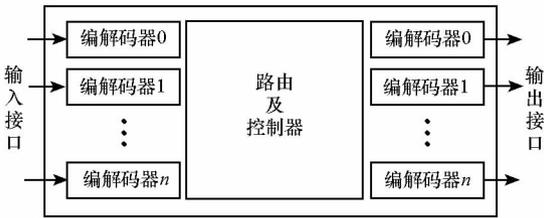


图 1 SpaceWire 路由器结构图  
Fig. 1 Structure chart of SpaceWire

自适应群组路由机制是在 SpaceWire 协议标准 (ECSS-E-40-12A) 中提出的,其表述为:路由控制器能够按照所传数据包的大小自适应地改变路由结构,以提高总线的传输性能。图 2 所示为双路由单元的自适应群组路由机制的示意图,路由单元为路由器内最小的逻辑单元,图中 A 和 B 分别表示两个路由单元, $k$  表示输入接口的数量, $x$  表示路由通路的数量,在工程应用中  $k+x$  为恒定值,表示路由单元的总接口数。若源节点  $In_1$  需要发送数据包到目的节点  $Out_3$ ,一般路由机制下路由单元 A 将某一通路 (如通路 3) 分配给  $In_1$

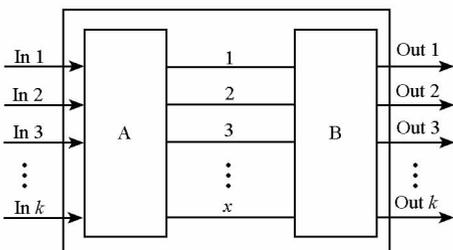


图 2 双路由由自适应群组路由示意图  
Fig. 2 Sketch of double-router group adaptive routing

用于传输该数据包,若此时该通路正在发送其他的数据,数据包将停留在路由单元 A 中等待,直到该通路完成当前任务再执行源节点  $In_1$  的传输任务;而自适应群组路由机制能够检测并配置其他连接通路实现路由单元 A 到路由单元 B 之间的互联,减少数据的传输等待。

## 2 自适应路由拓扑结构性能算法研究

### 2.1 双路由单元定义

SpaceWire 路由器可以由 1 个或多个路由单元构成,因此会产生不同的拓扑结构。为了方便描述不同拓扑结构下路由器的性能,这里定义如下几个概念。

定义:将连接源节点和目标节点路由通路的路由单元个数称为跳度,用  $J$  表示。路由路径在一个路由单元内实现时, $J=1$ ;路由路径经过两个路由单元实现时, $J=2$ ,并称之为双路由单元组;由两个以上路由构成的拓扑称为多路由拓扑系统。

命题:多路由拓扑系统可视为由  $J \leq 2$  路由拓扑构成。

### 2.2 双路由单元组性能评价方法

#### 2.2.1 系统传输时间计算方法

根据图 2 所示的双路由单元结构,以输入接口  $In_i (i=1,2,\dots,k)$  为例描述数据的传输过程,设定第一个输入接口 ( $In_1$ ) 发出传输请求的时刻为开始时刻,其余各输入接口通过申请取得发送数据的权利,请求发送数据的时刻随机,服从  $[0, 10]$ ms 范围内的均匀分布,即源节点  $In_i$  发出传输操作请求距离起始时刻的等待时间为  $T_r(i) \sim U(0,10)$ ms;当输入接口申请得到发送权时,路由控制器需要检测路由通路的空闲状态,每次检测均是从通路 1 开始检测,直到检测到空闲通路为止,令每检测一次的时间为  $T_{find}$ ,若检测到第  $n$  条通路空闲,则建立互联,所用的检测时间为  $T_f(i) = n \times T_{find}$ ;建立通路后开始传输数据,令第  $i$  个发送设备的数据量大小为  $D(i)$ , $D(i)$  数据包采用 RMAP 协议中的数据包格式,最大的数据量为 16 MByte,每次传输的数据包大小为 1 ~ 16 MByte;路由单元的物理传输速度为  $S$  MByte/s,则源节点  $In_i$  的数据包传输所需的时间为  $T_T(i) = D(i)/S$ ;若无空闲路由通路时,则会发生数据传输阻塞,源节点需要等待直到有空余传输通道时才能进行数据的请求和传输,设第  $i$  个输入接口的等待时间为  $T_w(i)$ 。

根据上述数据传输的基本原理,对于源节点  $i$  通过接口  $In_i$  将数据包成功传输所需要的时间可用式(1)计算。

$$T(i) = T_r(i) + T_T(i) + T_F(i) + T_w(i) \quad (1)$$

式中,  $T(i)$  表示第  $i$  个输入接口所需的总传输时间。

根据数据传输过程中是否有数据阻塞可将数据的传输时间分为两种状态,下面以输入接口数量  $k$  与路由支路数  $x$  之间的大小关系为依据,讨论双路由单元系统的传输时间问题。

1) 当  $k \leq x$  时,输入接口的数量小于于路由通路的数量,  $k$  个输入接口均可分配一个路由通路进行数据传输,整个传输过程中没有数据阻塞,即  $T_w(i) = 0$ , 则:

$$\begin{aligned} T(i) &= T_r(i) + T_T(i) + T_F(i) \\ &= T_r(i) + \frac{D(i)}{S} + n \times T_{\text{find}} \end{aligned} \quad (2)$$

计算中,假设第  $i$  个输入通道在建立路由连接时需要进行  $n$  次检测。

2) 当  $k > x$  时,由于路由通道的数量少于输入接口的数量,可能会出现传输数据阻塞问题,即会出现  $T_w(i) \neq 0$ , 则:

$$T_w(i) = (m - 1) \times k \times T_{\text{find}} \quad (3)$$

式中,  $m$  表示路由控制器在第  $m$  次循环检测时检测到空余通道,该通道的标号为  $n$ 。

因此,对于一个含有  $k$  个输出接口的双路由系统,总传输时间为系统的起始时刻(设为 0)到最后一个路由通路完成数据传输的时刻,可采用式(4)计算。

$$R_{J=2} = \max(T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_k) \quad (4)$$

式中,  $R_{J=2}$  表示双路由系统的传输时间,  $\max(\ )$  表示求最大值。

### 2.2.2 资源耗电量计算方法

一个路由器由若干个路由单元组成,如前文所述,路由单元又由编解码器、路由结构控制器等单元组成。当路由单元的接口分别对外连接外部设备、对内连接其他路由单元时,接口的硬件结构有所不同,所耗费资源也随着接口的分配数目变化,下面讨论不同拓扑结构所耗费的硬件资源评价算法。

将一个路由单元所耗资源分为三部分:与外部连接的接口部分  $Z_1$ ,与路由单元连接的接口部分  $Z_2$ ,路由矩阵及控制器部分  $Z_3$ 。因此,可采用式(5)计算一个双路由系统所耗费的资源量。

$$Z_{J=2} = 2k \times Z_1 + 2x \times Z_2 + 2Z_3 \quad (5)$$

式中,  $Z_{J=2}$  表示双路由单元系统耗费的资源量;

$Z_1, Z_2$  和  $Z_3$  的取值与具体的硬件实现方法以及实现平台密切相关,在本文讨论中,根据已实现的 IP 核集,采用经典 IP 核所使用资源的规模为例进行测试。

## 2.3 多路由拓扑系统性能评价方法

### 2.3.1 基本参数及约束条件定义

假设多路由拓扑系统包含  $a$  个外部设备,路由系统由  $b$  个路由单元构成,每个路由单元有  $c$  个接口,其中  $k$  个接口用于连接外设。可得到以下不等式约束:

$$b \geq 2 \quad (6)$$

$$1 < k < c \quad (7)$$

$$c - k \geq b - 1 \quad (8)$$

其中,不等式(6)表示路由系统至少由 2 个路由单元组成;不等式(7)表示用于外设的接口数量约束;不等式(8)保证了系统在路由配置过程中所有外部设备可在  $J=2$  的路由拓扑结构中实现连接。

### 2.3.2 多路由拓扑系统的传输时间计算

连接在 SpaceWire 路由器的  $a$  个外设中,任意两个外设都会有通信需求,即源节点和目的节点的组合有  $C_a^2$  种。其中,  $J=1$  的通信组合是在一个路由单元内部实现,路由单元内部的传输性能用  $R_{J=1}$  表示,由路由单元内部的物理结构决定,为一个固定的数值,这样的组合有  $b \times C_k^2$  个。其他源节点和目的节点的通信均通过  $J=2$  的双路由单元组实现,这样的组合有  $C_a^2 - b \times C_k^2$  个。

在上述路由器中,任意两个路由单元都可以组成一个双路由单元组,即得出  $J=2$  的双路由单元组的个数为  $C_b^2$ ,用  $d$  表示一个双路由单元组中两路由单元之间互联的通路数目。当路由器由 2 个路由单元组成时,路由器的性能完全由这个双路由单元组的性能决定。当路由器内路由单元超过 2 个时,会形成若干个双路由单元组,假设所有源节点和目的节点实现通信的事件发生概率相同,所有双路由单元组的性能平均会使得路由器整体性能更优,因此提出多个路由单元之间组成趋于等价的拓扑结构,使得所有双路由单元组的性能趋于一致。

趋于等价的拓扑结构中,可能出现如下几种情况:

1) 严格完全等价拓扑结构。每个路由单元用于内部连接的接口  $(c - k)$  恰好可以平均分配给其他路由单元,即表达式(9)能够整除,实现平均互联,所有路由单元之间的互联拓扑是等价的,

称为等价拓扑结构。

$$d = \frac{c-k}{b-1} \quad (9)$$

式中,  $d$  表示整除后的商。

2) 次完全等价拓扑结构。若路由器由偶数个路由单元组成, 并且每个路由单元用于内部连接的接口不能平均分配给其他路由单元, 即  $(c-k)/(b-1)$  不能整除, 则先进行严格等价拓扑结构的搭建, 每个双路由单元组的互联通路数目为  $(c-k)/(b-1)$  的整数部分。在严格等价互联之后, 每个路由单元还有  $c-k-d(b-1)$  个接口闲置未实现连接, 令剩余的接口以某种结构平均连接到其他路由单元上。可以将  $b$  个路由单元均分为两部分, 每部分有  $b[c-k-d(b-1)]/2$  个接口闲置, 两部分的闲置口平均对应连接, 可以实现附加  $b[c-k-d(b-1)]/2$  条通路, 平均连接在  $b[c-k-d(b-1)]/2$  个双路由单元组中, 即有  $b[c-k-d(b-1)]/2$  组双路由单元组内部互联通路为  $d+1$ , 有  $C_b^2 - 0.5b[c-k-d(b-1)]$  组双路由单元组内部互联通路为  $d$ 。可以描述为:  $C_b^2 - 0.5b[c-k-d(b-1)]$  个性能为  $R_{J=2}(k;d)$  双路由单元组,  $b[c-k-d(b-1)]/2$  个性能为  $R_{J=2}(k;d+1)$  的双路由单元组。

3) 非完全等价拓扑结构。若路由器由奇数个路由单元组成, 在进行严格等价拓扑结构的搭建时, 每个双路由单元组的互联通路数目为  $(c-k)/(b-1)$  的整数部分。进行再次分配时, 必有一个路由单元不在附加网络中, 排除一个路由单元之后, 其他偶数个路由单元构成次完全等价拓扑结构, 即可由  $C_b^2 - 0.5(b-1)[c-k-d(b-1)]$  个  $R_{J=2}(k;d)$  双路由单元组、 $0.5(b-1)[c-k-d(b-1)]$  个  $R_{J=2}(k;d+1)$  的双路由单元组构成。

综上所述, 一个路由器的性能可以表述为:

$$R = \frac{b \times C_k^2}{C_a^2} \times R_{J=1} + \frac{C_a^2 - b \times C_k^2}{C_a^2} \times R_{J=2} \quad (10)$$

$R_{J=2}$  可由式(11)计算:

$$R_{J=2} = \begin{cases} \frac{b \times X}{2C_b^2} \times R_{gh1} + \frac{C_b^2 - \frac{b}{2} \times X}{C_b^2} \times R_{gh0} & b \text{ 为偶数} \\ \frac{(b-1) \times X}{2C_b^2} \times R_{gh1} + \frac{C_b^2 - \frac{b-1}{2} \times X}{C_b^2} \times R_{gh0} & b \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $X = c - k - d(b - 1)$ ,  $R_{gh1} = R_{gh}(k; d + 1)$ ,  $R_{gh0} = R_{gh}(k; d)$ 。

### 2.3.3 多路由拓扑系统的资源耗费

由于多路由拓扑系统可由多个  $J = 1$  和  $J = 2$

的路由拓扑结构组成, 因此对于含有  $a$  个外部设备路由器的资源耗费情况可采用式(12)计算。

$$Z = a \times Z_1 + \left\{ C_b^2 \times d + \frac{b[c-k-d(b-1)]}{2} \right\} Z_2 + b \times Z_3 \quad (12)$$

式中,  $Z$  表示多路由拓扑系统耗费的资源量。

## 3 基于蒙特卡洛模拟的仿真系统构建

### 3.1 双路由单元系统的仿真方法

采用式(1)计算双路由单元的传输时间, 模拟计算的流程如图 3 所示。

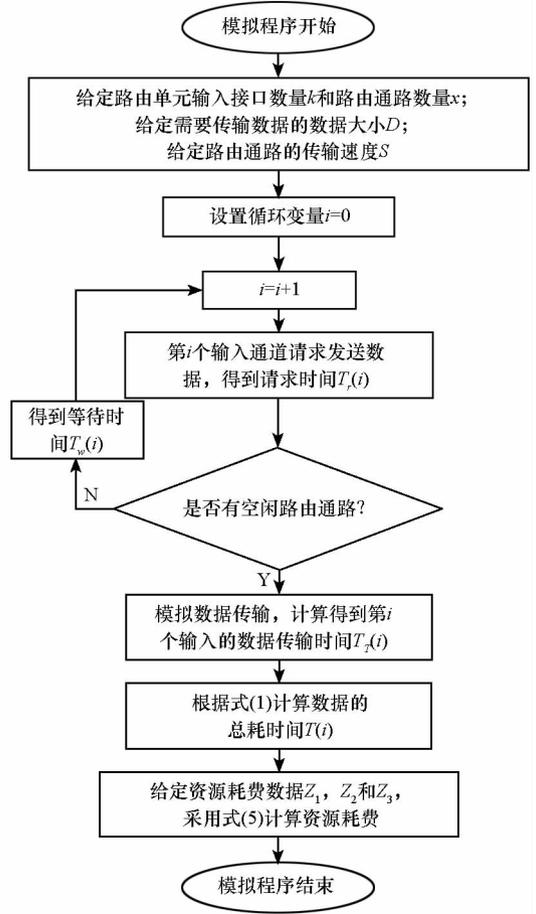


图 3 双路由单元的模拟流程

Fig. 3 Simulation flow of double-router cell

### 3.2 多路由单元的仿真方法

模拟过程主要分三个步骤: ①确定需要传输的数据量大小、所需的数据接口数量和路由单元的接口数量; ②采用双路由单元构造路由拓扑, 确定路由拓扑参数; ③模拟数据传输, 统计数据传输的总时间。详细的模拟过程如图 4 所示。

## 4 仿真对比及验证

### 4.1 性能测试对比

选择了 5 种典型拓扑结构进行测试, 表 1 所

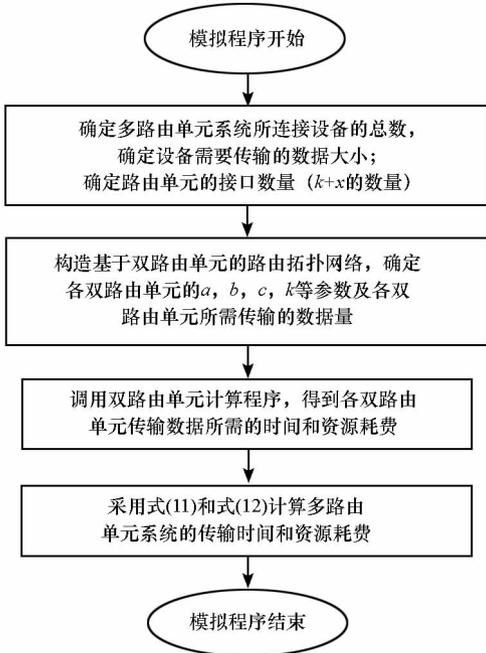


图 4 多路由单元系统的模拟流程

Fig. 4 Simulation flow of multi-router cell system

示为 5 组典型拓扑结构的参数配比,即:  $a$  和  $c$ , 并由此计算出每个拓扑结构的架构参数—— $k, d$  和  $d+1$ 。表中,编号 1 为 12 个外设的情况下,由 4 个 8 口路由单元组成的路由拓扑结构,其中构建严格完全等价拓扑结构中的任意两个路由单元之间的物理通路为 1,另外仍有次完全等价路由拓扑结构的附加通路,因此部分路由单元之间的物理通路为 2。以此类推,编号 2 的测试数据为 12 个外设 3 个 8 口路由单元组成的路由拓扑结构。编号 3 为 10 个外设情况下,2 个 8 口路由单元构建的路由拓扑。因此得出编号 1~5 的性能分别由哪几种双路由单元的性能组成,如表 1 中右侧所示。

表 1 5 种典型路由拓扑结构参数

Tab. 1 Parameters of 5 typical route topological systems

编号	$a$	$b$	$c$	$k$	$d$	$x$	$R_{j=2}$ ( $k:d$ )	$R_{j=2}$ ( $k:d+1$ )
1	12	4	8	3	1	2	(3:1)	(3:2)
2	12	3	8	4	2	2	(4:2)	(4:2)
3	10	2	8	5	3	3	(5:3)	(5:3)
4	9	3	6	3	1	2	(3:1)	(3:2)
5	15	5	12	3	2	2	(3:1)	(3:2)

从表 1 可以看出,在仿真计算时需要测试的  $R_{j=2}$  数据有 (3:1), (3:2), (4:2) 和 (5:3), 然后可基于这四组双路由配置方法模拟计算上述 5 种案例的传输时间和系统资源耗费用量。表 2 为分别采用蒙特卡洛模拟方法(方法 1)和 OPNET 仿真软件(方法 2)计算得到的系统传输时间和资源耗费用情况。

表 2 5 种典型路由拓扑结构的性能指标

Tab. 2 Performance of 5 typical route topological systems

性能指标	1	2	3	4	5	
方法 1	耗时/ ms	1.367	1.374	1.106	1.493	1.168
	耗资源	99	63	85	54	105
方法 2	耗时/ ms	1.364	1.372	1.104	1.491	1.166
	耗资源	99	63	85	54	105

采用本文的性能评价指标计算出的结果与 OPNET 软件计算的结果基本相同,仅传输耗时计算的结果有一定的偏差,方法 1 计算的结果稍微偏大,但是误差在小数点后 3 位,相对误差很小。

#### 4.2 最佳传输接口配置方法

从上述的测试算例中可以发现,当路由单元的输入接口配置数量较少时,系统的总传输时间较小,但是系统的资源耗费却很大;而当输入接口配置数量较多时,则反之。因此可通过模拟程序迭代计算搜索到一种最佳的传输接口配置方法,使得传输时间和资源耗费的综合性能达到最优。定义综合性能评价指标为  $P_{com}$ ,采用归一化方法将影响多路由系统性能的传输时间和资源耗费用情况以极端情况为参考量纲进行无量纲化,得出综合性能评价指标的计算方法如式(13)所示。

$$P_{com} = \frac{R}{R_{max}} + \frac{Z}{Z_{max}} \quad (13)$$

式中,  $P_{com}$  表示多路由系统的综合评价指标,  $R_{max}$  和  $Z_{max}$  分别表示多路由单元系统的最大传输时间和最大资源耗费用。

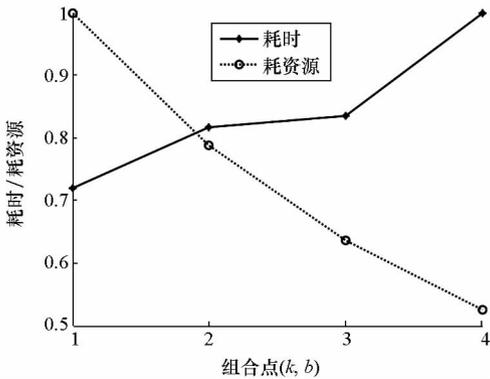
这里构造两种案例研究最佳的端口配置方法:①外设数量为 12(即  $a=12$ ),  $c$  设置为 8,每个外设需要传输的数据为 [1, 16] MByte;②外设数量为 18,  $c$  设置为 16,各外设的数据量与上述相同。通过上述采用双路由单元配置多路由单元系统的方法,可得出这两种案例的不同输入接口和路由通路的配置组合,如表 3 所示。

表 3 两种案例的配置参数

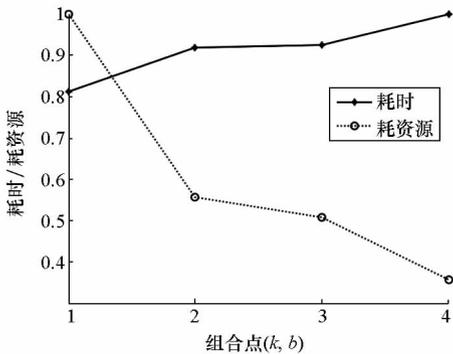
Tab. 3 Configuration parameters of two cases

案例	组合点				
	1	2	3	4	
案例 1	$b$	6	4	3	2
	$k$	2	3	4	6
案例 2	$b$	9	6	3	2
	$k$	2	3	6	9

分别采用表中的配置参数构成基于双路由单元的多路由系统,对不同组合时的传输时间和资源耗费进行模拟计算,得到图 5 所示的变化曲线,图中将传输时间和资源耗费均进行了归一化处理,表 4 所示为两种案例在不同组合时的综合性能指标  $P_{com}$ 。可以看出,两种算例均存在一种最佳的输入接口和路由通路数量的组合,使得多路由系统的综合性能指标达到最优;案例 1 的最佳组合点为(3,4),案例 2 的最忌组合点为(9,2)。



(a) 方案 1 不同组合点的耗时与资源消耗对比  
(a) Contrast of consuming time and resource consumption in case 1



(b) 方案 2 不同组合点的耗时与资源消耗对比  
(b) Contrast of consuming time and resource consumption in case 2

图 5 不同方案配置时耗时与耗资源对比

Fig. 5 Contrast of consuming time and resource consumption under different interface configurations

表 4 两种案例在不同接口配置时的综合性能

Tab. 4 Comprehensive indicators of two cases under different interface configurations

案例	组合点			
	1	2	3	4
案例 1	1.752 5	1.617 2	1.470 8	1.525 3
案例 2	1.857 2	1.608 0	1.414 1	1.362 3

## 5 结论

本文推导了 SpaceWire 总线中双路由单元的系统传输时间和耗费资源计算方法,研究了多路由系统的性能评价体系,给出了归一化的综合性能指标;分析了多种路由配置时路由系统传输时间的概率分布特性,其计算结果与 OPNET 网络仿真软件计算的结果一致,验证了本文所述性能评价体系的准确性。研究表明:在不同接口配置时,SpaceWire 自适应群组存在一种最佳的配置方式,能够使得系统的性能达到最优。

## 参考文献 (References)

- [1] ECSS - E - ST - 50 - 12C. Space engineering; SpaceWire—links, nodes, routers and networks [ S ]. Netherlands: European Cooperation for Space Standardization, 2008.
- [2] Parkes S, Sheynin Y, Nomachi M, et al. SpaceWire missions and architectures[ C ]//Proceedings of the 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Korea, 2009, 4.
- [3] Roberts D, Parkes S. SpaceWire missions and applications[ C ]// Proceedings of International SpaceWire Conference, 2010.
- [4] NASA. Official NASA swift homepage[ EB/OL ]. [ 2015 - 01 - 14 ]. <http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/swiftsc.html>.
- [5] ESA. ESA-space science-Gaia overview[ EB/OL ]. [ 2015 - 01 - 25 ]. [http://www.esa.int/esaSC/120377\\_index\\_0\\_m.html](http://www.esa.int/esaSC/120377_index_0_m.html).
- [6] 杨志, 李国军, 李芳, 等. SpaceWire 星载网络通信协议设计[ J ]. 宇航学报, 2012, 33(2): 200 - 209.  
YANG Zhi, LI Guojun, LI Fang, et al. Design of communication protocol for SpaceWire on-board networks[ J ]. Journal of Astronautics, 2012, 33 ( 2 ): 200 - 209. ( in Chinese )
- [7] 田园, 张杰. 基于 SpaceWire 的链路状态算法研究与设计[ J ]. 计算机工程, 2011, 37(23): 113 - 115.  
TIAN Yuan, ZHANG Jie. Research and design of link-state algorithm based on SpaceWire [ J ]. Computer Engineering, 2011, 37(23): 113 - 115. ( in Chinese )
- [8] Cook B M, Walker C P H. SpaceWire network topologies[ C ]// Proceedings of International SpaceWire Conference, 2007.
- [9] 代真, 何锋, 熊华钢. 混合机制下的 SpaceWire 传输延时仿真分析[ J ]. 计算机工程与设计, 2015, 36(1): 1 - 5.  
DAI Zhen, HE Feng, XIONG Huagang. Transmission delay simulation and analysis in SpaceWire under combined mechanism[ J ]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(1): 1 - 5. ( in Chinese )
- [10] 侯剑儒, 陈晓敏. SpaceWire 时延抖动的仿真[ J ]. 国防科技大学学报, 2013, 35(5): 114 - 118.  
HOU Jianru, CHEN Xiaomin. The simulation on the delay jitter of SpaceWire [ J ]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(5): 114 - 118. ( in Chinese )