

SpaceFibre 网络服务质量时隙资源分配算法*

郑静雅^{1,2}, 安军社¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心 复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为保证 SpaceFibre 星载数据网络大量实时数据流的超高速确定性传输,提出一种包含两个子算法的 SpaceFibre 网络服务质量时隙资源分配算法。形式化描述网络服务质量机制,给出调度矩阵相关定义;创建网络服务质量排队模型,定量分析时隙资源分配对网络时延性能的影响;考虑网络兼容性和算法鲁棒性,给出改进二进制序列调度子算法;采用提高初始种群进化程度和增加遗传算子等方法,给出改进混合单亲遗传调度子算法;利用 Opnet 网络仿真平台建立网络服务质量仿真模型,对比不同算法下网络时延性能。仿真结果表明,该时隙资源分配算法与其他算法相比,网络平均延时降低,网络性能得到显著改善,对构建低延时 SpaceFibre 网络具有参考意义。

关键词:星载网络;SpaceFibre;服务质量;分析建模;性能优化

中图分类号:TP393.1 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2021)02-074-10



听语音
与作者互动
聊科研

Time-slot allocation algorithm of quality of service for SpaceFibre

ZHENG Jingya^{1,2}, AN Junshe¹

(1. Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space Systems, National Space Science Center,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to achieve the deterministic transmission of the massive real-time data streams in a short time on the SpaceFibre onboard data network, the time-slot allocation algorithm of QoS (quality of service) for SpaceFibre was proposed. Formally the QoS of SpaceFibre network was described and the definitions of scheduling matrix were given; the queuing model of QoS was created and the impact of time-slot allocation on delay performance was quantitatively analyzed; From the perspective of network compatibility and robustness of algorithm, an improved binary sequence scheduling sub-algorithm was derived; the improved hybrid partheno-genetic scheduling sub-algorithm with the highly evolved initial population and more genetic operators was given; the SpaceFibre communication model was established by using the Opnet network simulation platform to compare with the delay performance under different algorithms. Simulation results show that the time-slot allocation algorithm has lower average latency compared with other algorithms. The performance of the network is optimized. The research results can provide a reference for building a low-latency SpaceFibre network.

Keywords: onboard network; SpaceFibre; quality of service; analytical model; performance optimizing

随着空间探测任务复杂度不断提升,卫星有效载荷通信网络的数据量迅猛增长、数据传输速率不断提高,现有 SpaceWire^[1]等星载数据网络已不能满足超高速率航天应用场景。因此欧洲航天局提出了新一代超高速星载数据链路 SpaceFibre 技术^[2],该技术具有高传输率、高带宽、低误码率等特点^[3-5]。SpaceFibre 物理链路包含多条虚拟通道(Virtual Channel, VC),每条 VC 可发送不同类型数据流。当数据流过载导致多条 VC 同时请

求链路带宽资源时,SpaceFibre 网络采用服务质量(Quality of Service, QoS)机制对各虚拟通道进行仲裁,该机制由优先级优先权、预留带宽和调度三种子机制组成^[6]。

SpaceFibre 协议对优先级优先权子机制和预留带宽子机制进行了详细描述,但没有说明调度子机制中时隙资源分配方法。时隙资源分配控制网络带宽分配,直接影响系统时延性能。由于星载数据网络具有规模小、实时性和可靠性要求高

* 收稿日期:2020-03-03

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项基金资助项目(XDA15020205)

作者简介:郑静雅(1995—),女,山东德州人,博士研究生,E-mail:zhengjingya@nssc.ac.cn;

安军社(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:anjunshe@nssc.ac.cn

等特点,不宜直接套用其他网络调度算法^[7-8]。目前对 SpaceFibre 时隙资源分配问题的研究尚少,文献[9]提出一种简单二进制序列均匀调度表生成方法,仅占用较少硬件资源即可保证数据传输的确定性,但该方法在网络兼容性、算法鲁棒性和时延性能等方面还有待优化;文献[10]使用基本遗传算法生成调度表,然而该方法存在操作复杂和收敛速度慢等问题。

本文给出无调度、无冲突和冲突调度矩阵定义,建立网络 QoS 排队模型分析时隙资源数量、位置和周期对网络时延性能的影响。基于排队模型给出包含改进二进制序列调度子算法和改进混合单亲遗传调度子算法的时隙资源分配算法,两个子算法相辅相成、互为补充。前者通过改进时隙数目使算法向后兼容 SpaceWire 网络;为提高算法鲁棒性,增加时隙长度和链路带宽约束,并改进初始时隙位置生成方式;通过改进时隙补偿方法减少了时隙冲突。后者将前者生成的调度矩阵作为初始个体,在基因移动算子基础上增加交叉算子,并使用基因移动算子对交叉子代进行二次遗传操作。在 Opnet 平台下自行搭建网络 QoS 仿真模型,对算法有效性进行仿真分析。结果表明,该算法可根据不同数据流的特点生成具有航天工程实用价值的低延时 SpaceFibre 星载数据网络时隙资源分配方案。

1 SpaceFibre 网络 QoS 性能分析模型

1.1 网络服务质量机制分析

优先级优先权、预留带宽和调度三种 QoS 子机制均集成于 SpaceFibre 介质访问控制器 (Medium Access Controller, MAC) 中。

优先级优先权计算如式(1)所示^[2]。

$$PriPre_i = 2B(Q - 1 - E_i) + B \quad (1)$$

其中: B 表示带宽信用限制; Q 为优先级数; E_i 表示编号为 i 的 VC 优先级值, E_i 越小优先级越高。

预留带宽是一种依据虚拟通道预留带宽和 VC 带宽使用率计算带宽信用的 QoS 机制。带宽信用 $BWCredit$ 计算如式(2)所示^[2], n 为虚拟通道发送数据字的数目,可用带宽 $AvailBW$ 指自上次带宽信用更新起网络节点所有虚拟通道发送字数总和。已用带宽 $UsedBW$ 指自上次带宽信用更新后 VC_i 发送数据字的数目。标准化期望带宽 F_i 指 VC_i 分配带宽占链路总带宽的比例。

$$BWCredit_i = \sum_n \left(AvailBW_n - \frac{UsedBW_n}{F_i} \right) \quad (2)$$

优先权为 $PriPre$ 与 $BWCredit$ 之和。通常优

先级越高,优先权越大。当高优先级虚拟通道带宽信用达到 B 时,低优先级 VC 优先权才可能较大。

调度 QoS 子机制为链路的确定性传输提供保障。SpaceFibre 网络中时间轴被划分为若干固定长度的时帧,作为基本周期性时间单元。每个时帧又包含若干时隙,时隙是网络最小时间单位。

各虚拟通道均具有时帧调度向量,该向量记录本 VC 在一个时帧的各时隙中是否被允许参与调度。所有 VC 的时帧调度向量构成网络节点二进制调度矩阵,该矩阵行数目为 VC 数,列数目为时帧内总时隙数。调度矩阵中 1 表示有效时隙,即指定时隙允许该 VC 参与调度;0 表示空闲时隙,即在指定时隙不允许该 VC 发送任何数据。当同一时隙中允许多条虚拟通道参与调度时,MAC 选择优先权较大的虚拟通道进行数据传输。典型的 SpaceFibre 服务质量机制混合使用实例如表 1^[11] 所示,该表可抽象为二进制 8×8 调度矩阵。

表 1 SpaceFibre 网络 QoS 机制混合使用实例
Tab. 1 SpaceFibre QoS mechanism mixed instance

VC 号	时隙编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1	0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1

VC_0 和 VC_1 优先级最高,其他 VC 具有较低且相同的优先级。在时隙 1,除 VC_1 外其他虚拟通道均可参与调度。优先级最高的 VC_0 拥有最高优先权,所以在时隙 1 优先选择 VC_0 发送数据。当 VC_0 无发送数据请求时,MAC 在 $VC_2 \sim VC_7$ 中选择具有待发送数据且 $BWCredit$ 最高的虚拟通道发送数据。每进行一次数据发送操作,各 VC 均需更新带宽信用和优先权。优先级不变时,被调度 VC 的带宽信用降低,该虚拟通道优先权也降低,有效避免了单一 VC 持续抢占带宽资源的问题。三种 QoS 子机制的混合使用保证了关键卫星数据的优先传输,为网络的可靠传输提

供了保障。

在星载数据网络中,主要从数据传输延时、带宽和可靠性三方面对网络数据流的服务质量进行评估^[12]。不同空间任务流量对网络 QoS 的要求不同。例如控制类流量典型特征是数据包生成具有随机性、数据包较小和实时性要求较高,实时视频显示业务同时具有较高实时性需求和带宽需求。因此,需采取有效算法合理分配 SpaceFibre 网络时隙资源,以满足各有效载荷数据流的带宽需求,从而减少数据传输延时并保障数据可靠传输。

1.2 网络服务质量数学模型

1.2.1 网络条件约束及参数定义

以 SpaceFibre 网络 QoS 机制分析为基础,建立网络排队模型定量分析时隙分配对网络时延性能的影响。网络模型相应约束如下:网络运行期间链路无故障;网络运行时虚拟通道的数目保持不变;网络运行期间虚拟通道优先级值不变。为便于形式化描述,网络参数说明如表 2 所示。

表 2 模型参数表

Tab.2 Parameter list of model

参数名称	参数定义
N	网络节点虚拟通道数目
λ_i	VC_i 数据包到达速率
μ	MAC 服务速率
V_{link}	网络节点物理链路速率
L_{frame}	网络数据帧长度
\bar{X}	平均服务时间 $\bar{X} = 1/\mu$
\bar{X}^2	平均服务时间二阶矩
ρ_i	VC_i 服务台利用率 $\rho_i = \lambda_i/\mu$
\bar{W}_i	VC_i 平均等待时间
R_i	VC_i 平均剩余服务时间
V_i	VC_i 有效时隙等待时间
T_F	时帧长度
L	时帧内总时隙数
H_i	VC_i 时帧调度向量有效时隙数
τ	时隙长度
$S_{N \times L}$	网络节点二进制调度矩阵

根据 SpaceFibre 网络约束条件及参数定义引入调度矩阵相关定义。

定义 1 给定网络节点调度矩阵 $S_{N \times L}$, 对任意 $i \in [0, N-1], j \in [1, L]$ 均有 $s_{i,j} = 1$, 则称 $S_{N \times L}$ 为无调度矩阵。

定义 2 给定网络节点调度矩阵 $S_{N \times L}$, 对任意 $j \in [1, L]$ 有 $\sum_{i=0}^{N-1} s_{i,j} \leq 1$, 则 $S_{N \times L}$ 为无冲突调度矩阵。

定义 3 给定网络节点调度矩阵 $S_{N \times L}$, 存在 $j \in [1, L]$ 使得 $\sum_{i=0}^{N-1} s_{i,j} > 1$, 则称 $S_{N \times L}$ 为冲突调度矩阵。

根据网络服务质量分析和参数定义得到如图 1 所示的 SpaceFibre 网络时帧结构。

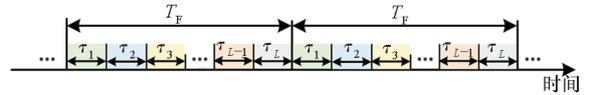


图 1 SpaceFibre 时帧结构

Fig. 1 Time frame structure of SpaceFibre

1.2.2 网络排队模型

SpaceFibre 星载数据网络服务质量可以抽象为单服务台、多虚拟通道队列的排队问题,排队模型如图 2 所示。每个队列代表一条虚拟通道,介质访问控制器 MAC 被抽象为服务台。虚拟通道数目 $N \in [1, 32], VC_i (i \in [0, N-1])$ 数据流符合到达速率为 λ_i 的泊松分布。 VC_0 至 VC_{N-1} 优先级依次降低。为排除缓存容量^[13]对网络时延性能的影响,排队系统最大队列长度为无穷大。

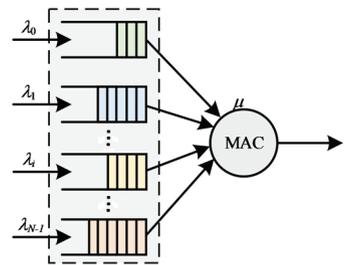


图 2 SpaceFibre 网络 QoS 排队模型

Fig. 2 Queuing model for SpaceFibre QoS

网络服务质量排队模型服务速率为:

$$\mu = V_{link}/L_{frame} \quad (3)$$

VC_i 平均端到端延时为:

$$T_i = \bar{W}_i + \bar{X} \quad (4)$$

若 $S_{N \times L}$ 为无调度矩阵,MAC 不使用调度子机制,网络 QoS 机制可进一步抽象为带有非抢占优先级的 M/G/1 排队模型,平均等待时间为^[14]:

$$\bar{W}_i = \frac{\sum_{m=0}^{N-1} \lambda_m \bar{X}^2}{2 \times (1 - \sum_{j=0}^{i-1} \rho_j) \times (1 - \sum_{k=0}^i \rho_k)} \quad (5)$$

无调度矩阵队列平均延时与时隙分配无关,仅与排队系统参数有关。在高优先级队列长期占

用链路带宽的极端情况下,低优先级队列平均延时可能会超出可接受范围。当高优先级带宽需求较大时,应采用调度子机制保障数据的确定性传输。

若 $S_{N \times L}$ 为无冲突调度矩阵,虽使用调度子机制,但不考虑高优先级抢占时隙的情况。平均等待时间如式(6)所示, $\rho_i W_i$ 为 VC_i 数据包传输时间。

$$\bar{W}_i = R_i + \rho_i \bar{W}_i \quad (6)$$

VC_i 数据包到达时有服务台正在服务 VC_i 和排队模型处于 VC_i 空闲时隙两种可能,相应 R_i 为:

$$R_i = \frac{1}{2} \lambda_i \bar{X}^2 + \frac{1 - F_i}{2V_i} \bar{V}_i^2 \quad (7)$$

VC_i 有效时隙间隔为 D_i , 第 k 个数据包到达时刻为 ε_k , $N(D_i)$ 为 D_i 时间内达到的数据包总数,则数据包有效时隙等待时间为过滤泊松过程:

$$V_i = Y_i(t) = h_i(t, \varepsilon, A) = \sum_{k=1}^{N(D_i)} D_i - \varepsilon_k \quad (8)$$

过滤泊松过程的特征函数为^[15]:

$$\phi_{Y(t)}(\omega) = \exp \left\{ \lambda_i \int_0^{D_i} [E_A(e^{j\omega h(t, \varepsilon, A)}) - 1] d\varepsilon \right\} \quad (9)$$

代入特征函数定义并对两侧同时求得 \bar{V}_i :

$$\bar{V}_i = \frac{1}{j} \frac{d}{d\omega} \phi_{Y(t)}(\omega) \Big|_{\omega=0} = \lambda_i D_i^2 / 2 \quad (10)$$

设随机变量 $X(t) = Y^2(t)$, 类似可得:

$$VAR(V_i) = \lambda_i D_i^3 / 3 \quad (11)$$

当时隙位置均匀分布时,有效时隙间隔为:

$$D_i = T_F / H_i \quad (12)$$

且时帧长度 T_F 满足:

$$T_F = L\tau \quad (13)$$

所以 $S_{N \times L}$ 为无冲突调度矩阵时,SpaceFibre 服务质量排队模型中 VC_i 平均等待时间为:

$$\bar{W}_i = \frac{\lambda_i \bar{X}^2 + 2 \times (1 - F_i)(L\tau / 3H_i + \lambda_i L^2 \tau^2 / 4H_i^2)}{2 \times (1 - \rho_i)} \quad (14)$$

若 $S_{N \times L}$ 为均匀无冲突调度矩阵, T_i 与排队模型参数、 L/H_i 比值和 τ 有关。其他参数一定时, τ 越大平均延时越长,所以应尽量选择较小时隙长度。无冲突调度矩阵存在部分时隙闲置问题,一定程度上增加了 \bar{V}_i , 进而增加了 T_i 。因此,高效分配时隙资源需综合考虑时隙冲突率和利用率两方面。

若 $S_{N \times L}$ 为冲突调度矩阵,平均延时需考虑优先级占用。 VC_i 最大平均等待时间为:

$$\bar{W}_i^{\max} = R_i + \sum_j^{lh} \rho_j \bar{W}_j + \sum_k^{lh} \rho_k \bar{W}_i + \rho_i \bar{W}_i \quad (15)$$

式中, $\sum_j^{lh} \rho_j \bar{W}_j$ 为同时隙 lh 个高优先级队列 $\sum_k^{lh} \rho_k \bar{W}_i$ 为同时隙内 VC_i 在等待发送过程中新到达的高优先级队列, $\rho_i \bar{W}_i$ 为 VC_i 队列的数据包传输时间。除 D_i 引入的等待时间, R_i 还包含同时隙内 lh 个高优先级和 lb 个低优先级队列剩余服务时间:

$$R_i = \frac{1}{2} \sum_m^{lh+lb} \lambda_m \bar{X}^2 + \frac{1 - F_i}{2V_i} \bar{V}_i^2 \quad (16)$$

经整理得:

$$\bar{W}_i^{\max} = \frac{\sum_m^{lh+lb} \lambda_m \bar{X}^2 + (1 - F_i)(D_i / 3 + \lambda_i D_i^2 / 4)}{2 \times (1 - \sum_j^{lh} \rho_j) \times (1 - \sum_k^{lh+1} \rho_k)} \quad (17)$$

若 $S_{N \times L}$ 为冲突调度矩阵且排队模型参数,同时隙队列数目一定时, D_i 越小平均延时越低,因此应尽量减少有效时隙间隔。此外,同时隙 VC 数不宜过多,否则会因增加平均等待时间而增加 T_i 。

2 SpaceFibre 网络 QoS 时隙分配算法设计

根据网络 QoS 性能分析模型,提出 SpaceFibre 网络服务质量时隙资源分配算法。该算法包含两个子算法:改进的二进制序列调度(Improved Binary Sequence Scheduling, IBSS)子算法和改进的混合单亲遗传调度(Improved Hybrid Partheno-Genetic Scheduling, IHPGS)子算法。IBSS 子算法是 IHPGS 子算法的初始种群之一, IHPGS 进一步降低了 IBSS 的网络延时。若 IBSS 生成的调度矩阵满足可接受延时要求,可不进行 IHPGS 操作,但两子算法相互配合可获得网络时延性能更优的时隙资源分配方案。

2.1 改进的二进制序列调度 IBSS

IBSS 在简单二进制序列算法^[9](Simple Binary Sequence Algorithm, SBSA)基础上根据实际工程应用场景进行修正。

为向后兼容 SpaceWire 时间码, IBSS 改进了时隙数目。SpaceWire 网络是先于 SpaceFibre 网络的上一代星载数据网络,该网络设置 6 bit 时间码以实现时间同步。为组建 SpaceWire 高速 - SpaceFibre 超高速星载数据网络,时帧 T_F 内的时隙数目 L 固定为 64。这一修正可能会使时帧长度增加而导致平均延时增加,但由式(13)知,可

通过调整时隙长度 τ 以保证 T_F 不变。

IBSS 增加了时隙长度约束以降低误码率。若完整数据帧传输时间大于 τ , 则在单个有效时隙内 MAC 无法发送完整数据段, 导致节点组帧失败, 进而, 引起数据传输错误。因此, τ 应大于最长 T_F 数据帧传输时间以保障所有 VC 数据正确传输, 设 n_{lane} 为 SpaceFibre 网络节点物理通道数, L_{fmax} 为网络最大数据帧长度, 则 τ 应满足:

$$\tau \geq \frac{L_{\text{fmax}}}{n_{\text{lane}} V_{\text{link}}} \quad (18)$$

IBSS 考虑了广播通道占用带宽对时隙资源分配的影响。除进行数据包传输外, SpaceFibre 网络还需分配部分带宽给广播通道以用于整个网络的监管。设广播消息预留带宽占链路总带宽比例为 p_b , 则每条虚拟通道期望带宽 F_i 修正为:

$$F_i = \frac{v_i}{(1-p_b)V_{\text{link}}} = \frac{P_i}{Q_i} \quad (19)$$

其中, P_i/Q_i 为期望带宽 F_i 的最简分式表达式。当 Q_i 大于 L 时, 要对 F_i 进行修正, 具体修正方式为 P_i 逐 1 增加, Q_i 保持不变, 直至新的最简分式满足:

$$F'_i = \frac{P'_i}{Q'_i}, Q'_i \leq L \quad (20)$$

VC_{*i*} 时隙调度向量为:

$$s_i = (s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,L}) \quad (21)$$

B_{total} 为链路在时隙 T_F 内的总带宽, VC_{*i*} 在 T_F 内分配带宽为 B_i , 则分配给 VC_{*i*} 的带宽比 R_i 为:

$$R_i = \frac{B_i}{B_{\text{total}}} = \frac{\sum_{j=1}^L s_{i,j}}{L} \quad (22)$$

令 $F'_i = R_i^{[9]}$, 得 VC_{*i*} 有效时隙数为:

$$H_i = \sum_{j=1}^L s_{i,j} = \lceil L \times F'_i \rceil \quad (23)$$

为避免虚拟通道首个有效时隙位置冲突, IBSS 子算法中 VC_{*i*} 首个有效时隙位于第 i 列, 剩余有效时隙在 $L - (i - 1)$ 个时隙中均匀分布。VC_{*i*} 有效时隙间隔 D_i^a 、 D_i^b 和相应有效时隙数 a_i 、 b_i 修正如下, “\” 为求余符号。

$$\begin{cases} D_i^a = \lfloor \frac{L - (i - 1)}{H_i} \rfloor \\ D_i^b = \lceil \frac{L - (i - 1)}{H_i} \rceil \\ a_i = H_i - b_i \\ b_i = [L - (i - 1)] \setminus H_i \end{cases} \quad (24)$$

IBSS 子算法对低优先级补偿和控制流量补偿操作进行改进。极端情况下, 简单二进制序列

算法的补偿操作可能会因时隙冲突而无法完成。为满足各流量带宽需求、减少时隙冲突, IBSS 在进行时隙补偿时, 选择最接近待补偿位置且冲突最少的空闲时隙位置进行置 1 处理。

IBSS 子算法具有硬件资源占用较少、延时较低、鲁棒性和兼容性较好等特点, 为 SpaceFibre 网络时隙资源的合理分配提供了基本保障。IBSS 描述示意如图 3 所示, 具体算法流程见算法 1。

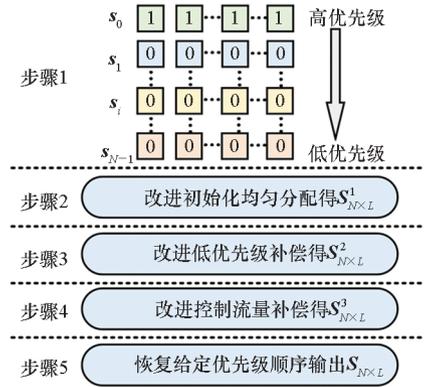


图 3 IBSS 描述示意

Fig. 3 Description of IBSS

算法 1 改进二进制序列调度 IBSS

Alg. 1 Improved binary sequence scheduling

已知: 网络节点 VC 数 N 、优先级值 E_i 和期望带宽 F_i 等。

1. 按优先级由高到低的顺序重新组合 N 路数据流量
2. for ($i=0, i < N, i++$)
3. { if ($i=0$) $s_0 = (1, 1, \dots, 1)$
4. else $s_i = 0$; } // 得到矩阵 $S_{N \times L}^0$
5. for ($i=1, i < N, i++$)
6. { 第 i 列开始放置首个有效时隙每隔 D_i^a 确定 $a_i - 1$ 个 1
7. 每隔 D_i^b 确定 b_i 个 1; } // 得矩阵 $S_{N \times L}^1$
8. for ($i=2, i < N, i++$)
9. { for ($j=1, j \leq L, j++$)
10. { 求 $S_{N \times L}^1$ 第 1 至 $i-1$ 行在时隙 j 的和; } // 得 w
11. 查找 $S_{N \times L}^1$ 第 i 行有效时隙并记录位置 l
12. for ($k=1, k \leq \text{length}(L), k++$)
13. { if ($w(l(k)) \neq 0$)
14. { for ($j=1, j \leq L, j++$)
15. { 求 $S_{N \times L}^1$ 第 1 行至 $N-1$ 行在时隙 j 的和; } // 得 v_1
16. 在 $S_{N \times L}^1$ 第 i 行 nearest($l(k)$) 且 $\min(v_1)$ 的空闲时隙位置进行置 1 补偿; } // 得矩阵 $S_{N \times L}^2$
17. for ($i=2, i < N, i++$)
18. { for ($j=1, j \leq L, j++$)
19. { 求 $S_{N \times L}^2$ 第 1 行至 $N-1$ 行在时隙 j 的和; } // 得 v_2
20. 在 $S_{N \times L}^2$ 第 i 行 nearest(L) 且 $\min(v_2)$ 的空闲时隙位置进行置 1 补偿; } // 得矩阵 $S_{N \times L}^3$
21. 将 $S_{N \times L}^3$ 恢复至输入顺序, 输出网络调度矩阵 $S_{N \times L}$

2.2 改进的混合单亲遗传调度 IHPGS

单亲遗传算法是一种取消了交叉操作并使用变异操作替代的特殊遗传算法。改进单亲遗传算法^[16] (Improved Partheno-Genetic Algorithm, IPGA) 消除了变异概率,修改了选择和变异操作使算法更加高效稳定,但该算法的遗传操作均在单条染色体上进行,易陷入“进化瓶颈”。

面向 SpaceFibre 星载数据网络应用的改进混合单亲遗传调度 IHPGS 子算法在 IPGA 遗传算子的基础上增加最优个体与次优个体交叉算子并使用基因倒位、基因换位、基因右移和基因左移等基因移动算子对交叉后的染色体进行二次遗传操作,增加了个体间的基因交互,有效克服了个体早熟的问题。IHPGS 子算法运行时只需设置初始种群规模和迭代终止条件,无须设置其他参数,具有遗传操作简单、运算速度快的特点。

IHPGS 子算法将 IBSS 生成的调度矩阵作为初始个体。整个初始种群包含 IBSS 生成的优良个体和按带宽需求生成的普通个体,进化过程中两者相互竞争并进行基因交换。一定进化程度的初始种群提高了 IHPGS 收敛速度,降低了算法对种群多样性的依赖。IHPGS 子算法描述如图 4 所示。

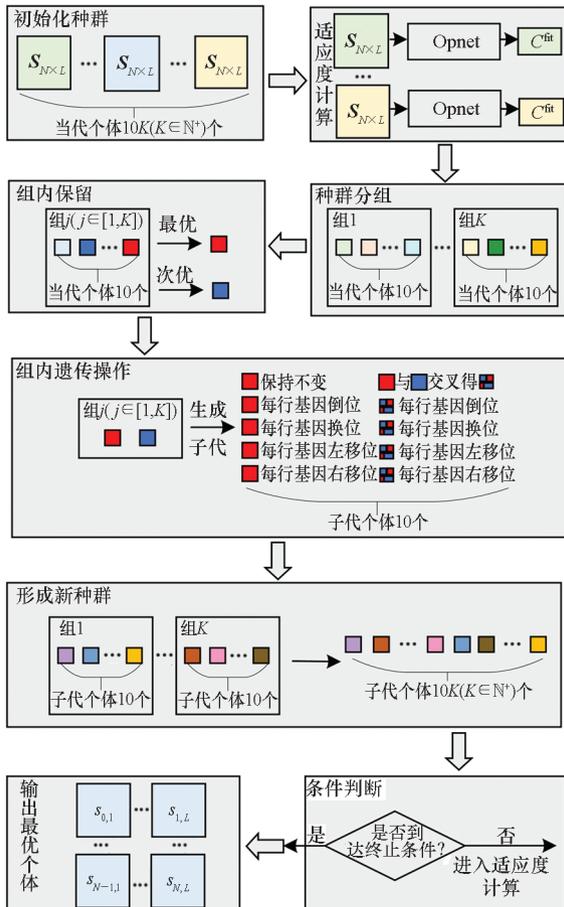


图 4 IHPGS 描述示意

Fig. 4 Description of IHPGS

初始种群大小为 $10K (K \in \mathbb{N}^+)$ 且初始种群包含 IBSS 生成的优良个体 $S_{N \times L}^3$ 。普通个体满足: $S_{N \times L}$ 每行对应 E_i 值逐渐增大; VC_0 时帧调度向量为 $s_0 = (1, 1, \dots, 1)$; 第 1 行至第 $N-1$ 行有效,时隙数为 H_i , 第 1 行至第 $N-1$ 行有效时隙位置随机生成。记录 $S_{N \times L}^3$ 各 VC 时帧调度向量有效时隙数 H_{IBSS} 以修正不满足带宽分配原则的交叉子代。

VC_i 优先级值为 E_i , 平均延时为 T_i , 则 IHPGS 子算法适应度函数 C^{fit} 为最小化调度矩阵个体中各虚拟通道平均延时加权:

$$C^{fit} = \min(\sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i T_i), \alpha_i = 1 - E_i / \sum_{j=0}^{N-1} E_j \quad (25)$$

十种遗传算子详细描述如下。基因移动算子在每次操作前需随机获取基因段首尾位置 I 、 $J (1 \leq I < J \leq L)$ 及插入位置 $P (P \in [1, I) \cup (J, L])$ 。

遗传算子 1: 组内最优个体保持不变。

遗传算子 2: 对组内最优调度矩阵个体每行执行基因倒位。基因倒位: 将 I 到 J 段的基因序列倒序, 并将倒序后的选定基因段插入位置 P 。

遗传算子 3: 对组内最优调度矩阵个体每行执行基因换位操作。基因换位: 仅交换位置 I 和 J 的基因, 将交换后的选定基因段插入位置 P 。

遗传算子 4: 对组内最优个体每行执行基因左移操作。基因左移: 位置 $I+1$ 到 J 的基因段向左移一个基因位, 位置 I 基因放至 J 原位置, 将移位后基因段插入位置 P , 具体操作见图 5(b)。

遗传算子 5: 对组内最优个体每行执行基因右移操作。基因右移: 位置 I 到 $J-1$ 的基因段向右移一个基因位, 位置 J 基因放至 I 原位置, 将移位后基因段插入位置 P , 具体操作见图 5(c)。

遗传算子 6: 对组内最优个体和次优个体每行执行交叉操作, 即第 i 行随机生成交叉位置 $Q (Q \in [1, L])$, 交叉子代第 i 行取最优个体第 i 行 1 至 Q 列和次优个体第 i 行 $Q+1$ 至 L 列; 计算交叉个体 s_i 有效时隙数 sum_i , 若 $sum_i > H_i^{IBSS}$, 则在 s_i 中随机挑选 $sum_i - H_i^{IBSS}$ 个有效时隙置为 0。

遗传算子 7: 对交叉子代每行执行基因倒位。

遗传算子 8: 对交叉子代每行执行基因换位。

遗传算子 9: 对交叉子代每行执行基因左移。

遗传算子 10: 对交叉子代执行基因右移。

迭代终止条件可以是最优调度矩阵个体各虚拟通道平均延时均在可接受范围内, 也可以是迭代次数限制, 还可以是适应度函数开始保持不变。具体终止条件需结合实际工程应用按需选择。

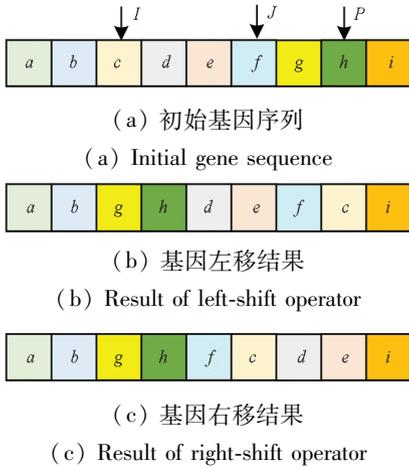


图 5 基因移位算子示意

Fig. 5 Description of shift operators

3 仿真与分析

3.1 仿真与验证

为深入探讨算法有效性,使用 Opnet 软件搭建网络仿真模型,对比不同算法生成调度矩阵的时延性能。Opnet 平台没有适用于 SpaceFibre 标准的仿真模块,在 Opnet Modeler 14.5 平台下自行搭建如图 6 所示网络 QoS 仿真模块,该模块包含数据包源、虚拟通道缓冲区、MAC 和发射机四部分。src0 ~ src5 数据包源生成指定速率的数据包并存储在相应 VC 缓冲区 queue0 ~ queue5 中。MAC 根据调度矩阵给定的传输方案进行仲裁,数据最终通过发射机传输到 SpaceFibre 网络。

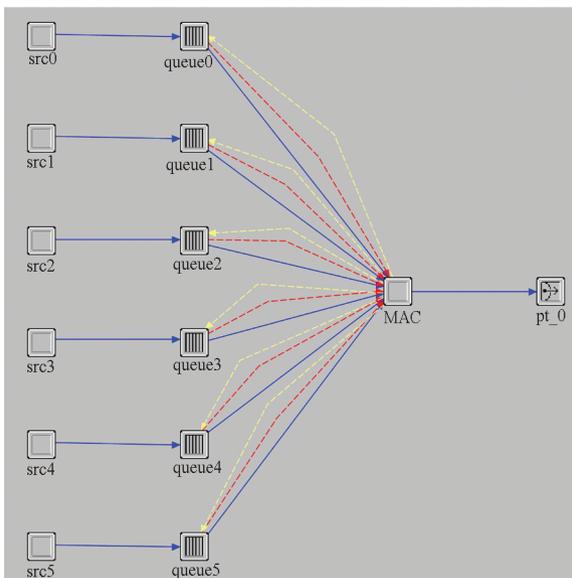


图 6 SpaceFibre 网络 QoS 仿真模型

Fig. 6 Simulation model of SpaceFibre QoS

仿真过程中各 VC 采用如表 3^[9]所示的流量

特征。不同流量类型依次对应 SpaceFibre 网络节点不同虚拟通道 VC₀ ~ VC₅。网络节点广播通道预留带宽为 10%, SpaceFibre 网络链路速率为 2.5 Gbit/s。

表 3 网络流量特征

Tab. 3 The characteristics of each traffic in the network

流量类型	生成速率	优先级
控制流量	随机	1 级
视频流量	600 Mbit/s	2 级
雷达流量	480 Mbit/s	3 级
地面流量	400 Mbit/s	4 级
传感流量	15 Mbit/s	5 级
卫星流量	120 Mbit/s	6 级

简单二进制算法时隙数 L_1 为 50 而 IBSS 子算法时隙数 $L_2 = 64$,由网络 QoS 排队模型知,需在相同时帧下对比两算法时延性能。分别设置时帧 T_F 为 25 μ s、50 μ s、100 μ s、200 μ s、400 μ s、800 μ s 和 1600 μ s 并编号为 0 ~ 6 组。计算不同 L 下 7 组 T_F 对应的时隙长度,计算结果如表 4 所示。

表 4 时隙长度

Tab. 4 Time-slot length

L	时隙长度/ μ s						
	组 0	组 1	组 2	组 3	组 4	组 5	组 6
50	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	16	32
64	0.39	0.78	1.56	3.13	6.25	12.5	25

为验证 IHPGS 子算法时延性能,将 IHPGS 子算法与 IBSS 子算法、基本遗传算法 (Classic Genetic Algorithm, CGA)^[10]、IPGA 算法、二进制粒子群优化 (Binary Particle Swarm Optimization, BPSO)^[17] 算法和二进制入侵杂草优化 (Binary Invasive Weed Optimization, BIWO)^[18] 算法进行对比分析。为比较各算法收敛速度,设置 CGA、IPGA、BPSO、BIWO 和 IHPGS 迭代终止条件均为循环数目达迭代次数限制值 30。各算法其他参数见表 5。

SpaceFibre 网络单通道节点的最大数据帧长度为 256 B,由式 (18) 可得,时隙长度需满足 $\tau \geq 0.8192 \mu$ s。根据网络 QoS 排队模型可知, τ 越大平均时延越大,因此选择 $\tau = 2 \mu$ s 进行不同算法调度矩阵的仿真验证。

表 5 不同算法参数

Tab. 5 Parameters of different algorithms

算法名称	参数名称	参数值
CGA	初始种群规模	20
	交叉概率	0.7
	变异概率	0.01
BPSO	粒子个数	20
	惯性权重	2
	学习因子	2
	最大速度	6
	初始杂草数	10
BIWO	最大杂草数	20
	最小种子数	1
	最大种子数	5
	方差减少指数	3
	标准差初始值	L
IHPGS/IPGA	标准差最终值	1
	初始种群规模	20

3.2 结果与分析

图 7 为 SpaceFibre 网络时隙资源分配 IBSS 子算法与简单二进制算法在 7 组时帧长度 T_F 下各虚拟通道平均延对比图。实线为简单二进制序列算法仿真结果,虚线表示 IBSS 子算法仿真结果。由分析结果可知,二者均实现了确定性延时。各 VC 平均延时随 T_F 的增加而增大,与网络排队模型分析结果一致。两种算法中控制流量队列 VC_0 的延时均维持在较低值。对比分析两种调度机制下 $VC_1 \sim VC_5$ 平均延时曲线可知,IBSS 子算

法对应虚拟通道平均延时曲线均低于简单二进制序列算法,且随 T_F 的增大 IBSS 子算法的优势越明显。

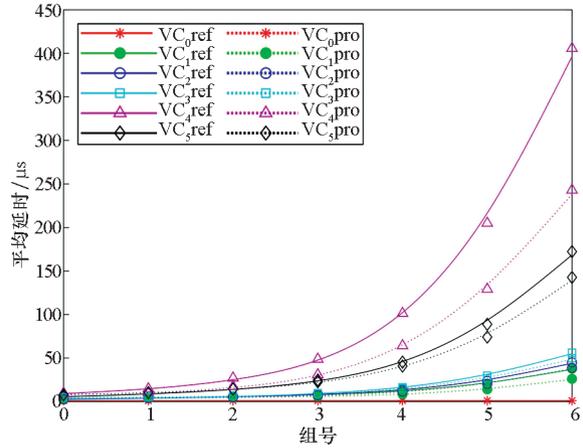
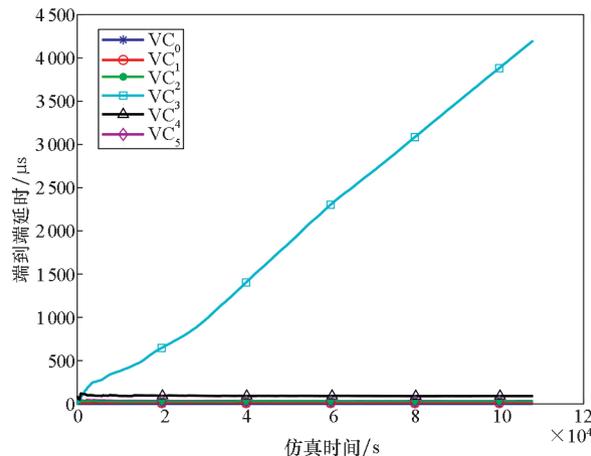


图 7 SBSA 与 IBSS 平均延时

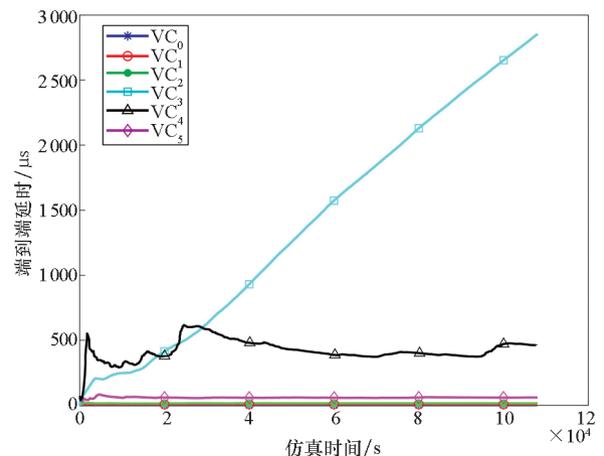
Fig. 7 Average delay under SBSA and IBSS

$\tau = 2 \mu s$ 时, IHPGS 子算法与 IBSS 子算法、CGA、IPGA、BPSO 和 BIWO 算法在 Opnet 网络仿真模型中的运行结果如图 8 所示。由图 8 可知,各调度机制下对时延性能要求较高的控制流量曲线都保持在较低位置。相比其他算法,IBSS 子算法和 IHPGS 子算法在 30 h 仿真时间内各 VC 延时均趋于平稳。因此,在收敛速度方面 IHPGS 要优于 CGA、IPGA、BPSO 和 BIWO 算法。IHPGS 子算法最高延时曲线 VC_4 要明显低于 CGA、IPGA、BPSO 和 BIWO 最高延时曲线。所以无论是收敛速度还是时延性能,IHPGS 均优于 CGA、IPGA、BPSO 和 BIWO。对比 IBSS 子算法和 IHPGS 子算法,后者相比前者其延时曲线更加集中,这意味着各虚拟通道平均延时更加均衡。当高优先级 VC 平均延时在可接受范围内时,低优先级虚拟通道数据传输机会增多。



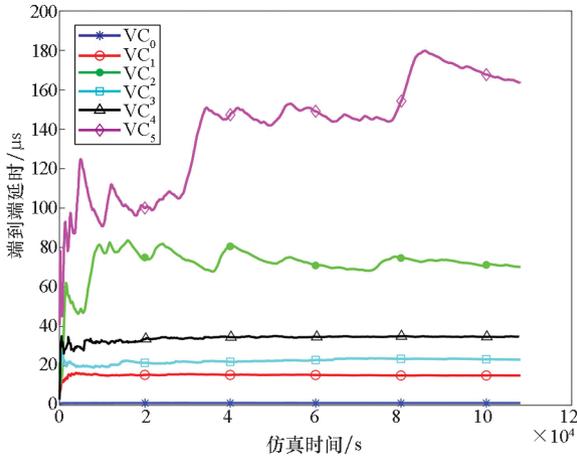
(a) CGA 各虚拟通道延时

(a) Delay of virtual channels under CGA



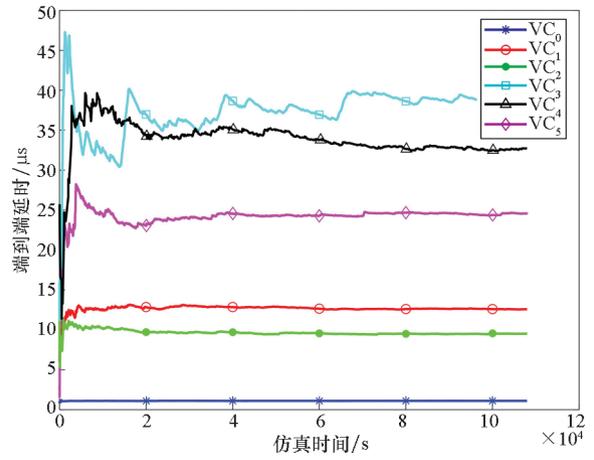
(b) BPSO 各虚拟通道延时

(b) Delay of virtual channels under BPSO



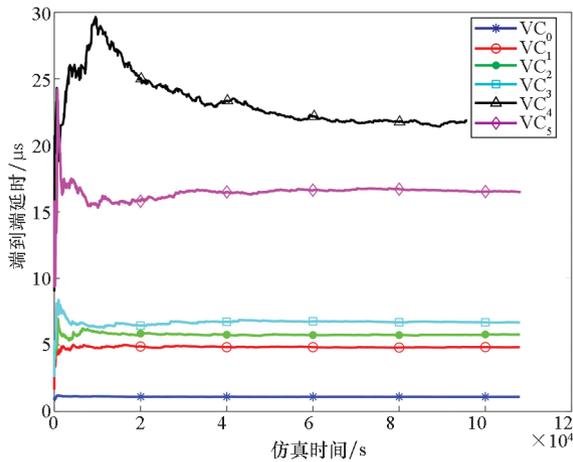
(c) IPGA 各虚拟通道延时

(c) Delay of virtual channels under IPGA



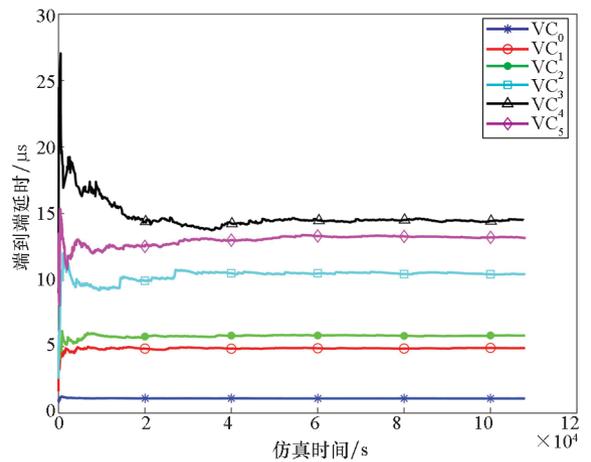
(d) BIWO 各虚拟通道延时

(d) Delay of virtual channels under BIWO



(e) IBSS 各虚拟通道延时

(e) Delay of virtual channels under IBSS



(f) IHPGS 各虚拟通道延时

(f) Delay of virtual channels under IHPGS

图 8 不同算法各虚拟通道延时

Fig. 8 Delay of virtual channels under different algorithms

计算图 8 不同算法各 VC 平均延时及平均延时加权,如表 6 所示。各虚拟通道平均延时加权和计算方法与式(25)相同,式中 VC_i 优先级越高,相应优先级值 E_i 越小,则 VC_i 权重 α_i 越大。分析可知,CGA、BPSO、IPGA、BIWO 算法、IBSS 子算法和 IHPGS 子算法虚拟通道平均延时加权和依次降低。相比 CGA、BPSO 和 IPGA 算法,IHPGS 子算法中 VC_0 平均延时略有增加但小于 $1.1 \mu s$ 。对比 CGA、BPSO、IPGA 和 BIWO 算法,IHPGS 子算法中 $VC_1 \sim VC_5$ 平均延时明显降低。相比 CGA,IHPGS 各虚拟通道平均延时分别下降 53.51%、78.81%、99.75%、83.92% 和 58.41%。IHPGS 各 VC 平均延时与 BPSO 相比分别下降 35.14%、60.76%、99.63%、96.86% 和 78.24%。相比 IPGA,IHPGS 子算法虚拟通道平均延时分别下降 67.58%、91.68%、54.80%、58.21% 和 91.94%。IHPGS 子算法中 $VC_1 \sim VC_5$ 平均延时

对比 BIWO 分别下降 61.11%、38.71%、72.22%、55.62% 和 46.50%。比较 IBSS 子算法和 IHPGS 子算法, $VC_0 \sim VC_2$ 平均延时基本相同,IHPGS 子算法 VC_4 和 VC_5 平均延时降低是以 VC_3 略微增加为代价的。若各 VC 可接受延时为 $15 \mu s$,这种均衡可使所有 VC 平均延时均在可接受范围内。

表 6 不同算法时延性能对比

Tab. 6 Delay performance under different algorithms

VC 号	调度机制					
	CGA	BPSO	IPGA	BIWO	IBSS	IHPGS
0	1.095	1.081	1.094	1.101	1.095	1.098
1	10.511	7.534	15.071	12.566	4.823	4.886
2	27.507	14.857	70.058	9.511	5.775	5.829
3	198.700	2 854.000	23.076	37.541	6.687	10.430
4	90.221	461.460	34.724	32.699	22.002	14.511
5	31.664	60.519	163.470	24.613	16.496	13.169
加权和	3 481.000	2 682.900	228.780	91.493	43.083	38.474

4 结论

对 SpaceFibre 网络服务质量机制进行分析并建立 SpaceFibre 网络 QoS 排队模型,定量分析时隙资源分配对虚拟通道平均延时的影响。基于时延性能分析模型,提出包含 IBSS 和 IHPGS 两子算法的 SpaceFibre 网络时隙资源分配算法。利用 Opnet 平台搭建网络服务质量仿真模型,对 IBSS 子算法、IHPGS 子算法、CGA、BPSO、IPGA 和 BIWO 生成的调度矩阵进行仿真验证并对比分析仿真结果。结果表明,该算法可明显降低网络平均延时,有效改善网络时延性能,为今后 SpaceFibre 星载数据网络设计实现中的时隙资源分配提供理论依据。该算法基于静态参数,在今后的研究中将分析 VC 数据流和物理传输参数的时变特征。

参考文献 (References)

- [1] LEONI A, NANNIPIERI P, FANUCCI L. VHDL design of a SpaceFibre routing switch [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2019, 102(5): 729-731.
- [2] ECSS. Space engineering: SpaceFibre, very high-speed serial link: ECSS - E - ST - 50 - 11C [S]. European Space Agency for the Member of ECSS, 2019.
- [3] PARKES S, FLORIT A F, VILLAFRANCA A G. SpaceFibre interfaces and architectures [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2019: 1-8.
- [4] PARKES S, FLORIT A F, VILLAFRANCA A G, et al. A prototype SpaceVPX lite (VITA 78.1) system using SpaceFibre for data and control planes [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2017: 1-9.
- [5] SOLOKHINA T, PETRICHKOVICH J, GLUSHKOV A, et al. Radiation tolerant heterogeneous multicore "system on chip" with built-in multichannel SpaceFibre switch for onboard data management and mass storage device: components, short paper [C]//Proceedings of International SpaceWire Conference IEEE, 2016: 1-6.
- [6] PARKES S, FLORIT A F, VILLAFRANCA A G, et al. SpaceFibre network and routing switch [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2017: 1-7.
- [7] 李建平, 张晗, 罗永, 等. 两段探测目标的传感器任务调度问题 0-1 规划模型及算法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(3): 121-129.
LI Jianping, ZHANG Han, LUO Yong, et al. The 0-1 programming model and algorithm for the problem of sensor task scheduling for double detection [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(3): 121-129. (in Chinese)
- [8] ALI H G E D H, SAROIT I A, KOTB A M. Grouped tasks scheduling algorithm based on QoS in cloud computing network [J]. Egyptian Informatics Journal, 2017, 18(1): 11-19.
- [9] 伊小素, 王家兴, 姜梦茹, 等. SpaceFibre 星载网络服务质量实现研究[J]. 宇航学报, 2019, 40(2): 207-214.
YI Xiaosu, WANG Jiaying, JIANG Mengru, et al. Research on realization of quality of service for SpaceFibre onboard networks [J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(2): 207-214. (in Chinese)
- [10] KOROBKOV I L. Algorithm for schedule-table's designing for SpaceFibre network technology [C]//Proceedings of Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2018: 1-6.
- [11] PARKES S, MCCLEMENTS C, MCLAREN D, et al. SpaceFibre: a multi-Gigabit/s interconnect for spacecraft onboard data handling [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2015: 1-13.
- [12] 姚睿, 羊宇中, 吴军. SpaceWire 网络混合路由机制设计[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(1): 78-85.
YAO Rui, YANG Yuzhong, WU Jun. Design of hybrid routing mechanism for SpaceWire networks [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(1): 78-85. (in Chinese)
- [13] 龚泉铭, 闫梦婷, 安军社, 等. SpaceWire 网络热点通信模式的缓存资源分配算法[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(2): 41-47.
GONG Quanming, YAN Mengting, AN Junshe, et al. Buffer allocation algorithm for SpaceWire network in hotspot communication mode [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(2): 41-47. (in Chinese)
- [14] 吴大鹏, 吴光锴, 王汝言. 带有上行数据帧聚合的光无线融合接入网络节能机制[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(3): 690-696.
WU Dapeng, WU Guangkai, WANG Ruyan. Energy-saving mechanism of integrated fiber-wireless access network with uplink data frame aggregation [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2018, 40(3): 690-696. (in Chinese)
- [15] SNYDER D L, MILLER M I. Random point processes in time and space [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [16] ZHOU H, SONG M, PEDRYCZ W. A comparative study of improved GA and PSO in solving multiple traveling salesmen problem [J]. Applied Soft Computing, 2018, 64: 564-580.
- [17] REMANI T, JASMIN E A, IMTHIAS I A T P. Load scheduling with maximum demand using binary particle swarm optimization [C]//Proceedings of International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), 2015: 294-298.
- [18] NIKNAMFAR A H, NIAKI S T A. A binary-continuous invasive weed optimization algorithm for a vendor selection problem [J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 140(6): 158-172.