doi:10.11887/j.cn.202302021

http://journal. nudt. edu. cn

SpaceFibre 星载数据网络低延时确定性调度算法^{*}

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:针对超高速 SpaceFibre 星载网络中多源数据传输的确定性和实时性应用需求,提出一种分类细 粒度低延时确定性调度算法。该算法基于差异化调度策略的思想,将数据流划分为三类。为实现网络资源 的细粒度分配,引入扩展时隙。该算法采用无冲突均匀调度方法,降低了数据包的平均排队延时。为适应有 效载荷组网的航天应用场景,该算法兼顾网络拓扑结构生成调度方案。为验证算法有效性,在 OPNET 仿真平 台下利用自定义建模技术搭建网络仿真模型。仿真结果表明:相比优先权调度和无冲突连续调度机制,该算 法实现了时间敏感数据流的确定性传输;随着时隙数目的增加,网络的延时性能和抗抖动性能显著提升,吞吐 量性能得到保证;该算法具有一定的航天工程实用价值。

关键词:星载网络;SpaceFibre;确定性调度;服务质量;性能优化 中图分类号:TN919.2 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID): 文章编号:1001-2486(2023)02-179-09



Deterministic scheduling method with low latency 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 diverse data streams in a short time on the SpaceFibre network, the fine-grained low-latency deterministic scheduling algorithm with classification was proposed. According to the differentiated scheduling strategy, space tasks were divided into three types. For the efficient allocation of resources, the extended time-slot was introduced. The uniform distribution of time-slot without conflict reduced the average delay of data packets. To adapt to aerospace applications where payloads were connected with a network, the method generated scheduling vectors based on the network topology. The simulation model of the SpaceFibre network in OPNET was built to verify the effectiveness of the method. Experimental results show that the scheduling scheme generated by the method has better certainty than the classic scheduling based on priority and conflict-free consecutive scheduling; with the increment of the number of time slots, the average delay and jitter of each traffic are reduced, and the throughput is guaranteed. Therefore, the method has certain practical application value in aerospace engineering. **Korwardo**, where a strack scheduling is unable ballion model of the spaceFibre network are space engineering.

Keywords: onboard network; SpaceFibre; deterministic scheduling; quality of service; performance optimizing

随着空间技术的不断发展,卫星综合电子系统 内的有效载荷数量和速率^[1-2]日益增加。现有的 SpaceWire^[3]等网络已不能满足超高速率复杂航天 应用场景。为此,欧空局提出了超高速 SpaceFibre 技术^[4],该技术采用服务质量(quality of service, QoS)机制管理各数据流。该机制由优先级优先 权、预留带宽和调度子机制组成^[5],其中调度子机 制为数据流的确定性传输提供了保障。

由于星载数据网络具有规模小、实时性和可 靠性要求高等特点,不宜直接套用其他网络^[6-8] 调度方案。SpaceFibre 协议中没有描述调度表生 成方法,目前对 SpaceFibre 网络确定性调度问题 的研究尚少:文献[9]给出了实时视频流传输的 抖动特性,但没有说明具体的调度方案;文 献[10]提出二进制序列均匀调度算法,可实现点 到点数据的确定性传输;文献[11]和文献[12]采 用遗传算法生成调度表,可获得较优的点到点确 定性调度方案。SpaceWire 网络的确定性调度算 法对 SpaceFibre 具有一定参考意义,该网络使用 图着色^[13]、模拟退火^[14]、多时间窗并行^[15]、多协 议并行^[16]等方法进行调度。但上述方案不适用 于服务质量需求差异较大的星载数据网络。部分

^{*} 收稿日期:2021-04-09

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,陕西渭南人,研究员,博士,博士生导师,E-mail:anjunshe@nssc.ac.cn

算法因不涉及网络拓扑信息,所以无法应用于卫 星有效载荷组网的航天场景。文献[17]考虑了 不同数据流特点和网络拓扑信息,通过无冲突连 续 调 度 (conflict-free consecutive scheduling, CFCS)实现了 SpaceWire 网络的确定性传输,然而 该算法不适用于 SpaceFibre 网络和延时性能要求 较高的应用场景。

本文提出一种面向 SpaceFibre 网络的分类细 粒度低延时确定性调度(classified fine-grained low-latency deterministic scheduling, CFLDS)算法, 该算法依据网络中各数据流对延时、带宽和可靠 性的不同需求将数据流划分为周期、异步和载荷 数据流三类,采用带扩展时隙的 CFCS 方法,兼顾 网络拓扑结构,生成各类数据流对应的调度方案。 该算法在保证数据流确定性传输的基础上,显著 改善了网络延时和抗抖动性能,可适用于服务质 量需求差异较大且延时性能要求较高的端到端星 载数据网络,对构建确定性 SpaceFibre 星载数据 网络具有参考意义。

1 SpaceFibre 网络确定性调度问题描述

1.1 网络服务质量机制

SpaceFibre 单条物理链路包含多条可传输不 同数据流的虚拟通道(virtual channel, VC)。多 条输出 VC 竞争链路资源时,SpaceFibre 采用 QoS 机制进行仲裁,该机制主要由介质访问控制器 (medium access controller, MAC)实现。优先级优 先权是最基本的 QoS 子机制,优先级值越小,优 先级优先权越大。预留带宽是一种依据 VC 预留 带宽和带宽使用率计算带宽信用的 QoS 机制。 VC 优先权是优先级优先权和带宽信用之和。当高 优先权数据带宽较高时,低优先权数据的传输延时 可能会超出截止时间。为保障数据传输的确定性, 进而保证星载数据网络的稳定性和实时性,应采用 调度 QoS 子机制对网络资源进行统一分配。

在 SpaceFibre 网络中基本的周期性时间单元称为时帧。每个时帧又被划分为若干时隙,时隙是该网络中最小的时间单位。各输出虚拟通道数据流均具有二进制时帧调度向量,该向量记录 VC数据流在各时隙中的调度信息:1 表示当前时隙为该虚拟通道的有效时隙,即当前时隙允许该 VC 参与链路资源的竞争;0 表示空闲时隙,即在指定时隙不允许该 VC 发送任何数据。当采用基于优先权的 经典调度(classic scheduling based on priority, CSBP)方法时,所有 VC 数据流时帧调度向量的元素均为1。单一时隙中多条 VC 数据流

请求发送数据时,MAC 选择优先权最大且被允许 参与调度的 VC 进行数据发送操作。

典型的 SpaceFibre 服务质量混合使用实例如 表 1^[5]所示。表 1 中 VC₀ 和 VC₁ 优先级最高, VC₂ ~ VC₅ 的优先级较低且相同。在编号为 1 的 时隙内,除 VC₁ 外,其他虚拟通道均被允许参与 调度。VC₀ 拥有最高优先权,所以在时隙 1 优先 选择 VC₀。当 VC₀ 缓冲区为空时,MAC 选择剩余 虚拟通道中具有发送数据请求且带宽信用最高的 进行调度。

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	
VC ₀	1	0	0	0	1	0	0	0	
VC_1	0	1	0	0	0	0	0	0	
VC_2	1	1	1	1	1	1	1	1	
VC ₃	1	1	1	1	1	1	1	1	
VC_4	1	1	1	1	1	1	1	1	
VC ₅	1	1	1	1	1	1	1	1	

1.2 网络数据流传输模型

SpaceFibre 网络拓扑具有很高的自由度^[4], 可根据工程应用需求进行设计。为保证网络结构 的可靠性、灵活性和可扩展性,复杂星载数据网络 的拓扑结构需满足以下条件^[17]:网络中任一节点 的数据包可通过单级或多级路由器到达网络中的 其他节点;单一节点通过路由器接入网络,单一路 由器可连接到多个节点或其他路由器设备。为进 行形式化描述,将 SpaceFibre 数据网络抽象为有 向连通图 G = (V, E, F)。其中: V 是由网络节点 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_p\}$ 和路由器 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_q\}$ 构 成的顶点集合,p和q分别为网络节点和路由器 的数目。有向连通图的边集合 $E = \{l_1, l_2, l_3, \cdots, l_n\}$ l_k 为物理通信链路集合, k 表示网络链路编号。 设 G 中存在 M 条端到端数据流,则网络中数据流 集合为 $F = \{f_0, f_2, \dots, f_{M-1}\}$ 。若网络的拓扑信息 已知且满足星载数据网络的拓扑结构需求,则数 据流 f_i 在网络中占用的链路资源可由 E_{f_i} ($E_{f_i} \subseteq$ E) 唯一确定。

为保证传输的规范性,数据流按照 SpaceFibre协议^[4]进行传输。图1为网络端口示 意图,每个端口分为发送端和接收端。发送端主 要包含 MAC 和输出 VC 缓冲区。接收端采用输 人数据解复用器将链路上到达的数据放入相同编号的输入 VC。端口中的每条 VC 对应唯一的虚 拟网络(virtual network, VN)号,SpaceFibre 网络 称这种关系为 VC – VN 映射。各端口 VC₀ 均映 射到 VN₀,用于传输网络配置和管理等重要信息。 通过 VC – VN 映射,SpaceFibre 网络被划分为多 个独立的虚拟网络,不同 VN 中的数据流互不干 扰。在实际型号任务中,为避免同一 VN 中的输 出端口冲突问题,每个虚拟网络一般仅包含单一 数据源^[18]。





图 2 为有向连通图 *G* 确定的 SpaceFibre 网络数据流传输示意图。图中每个节点均包含一个网络端口,每个路由器分为交叉开关矩阵和 *u* 个端





口。粗虚线代表数据流 f_i 从源节点 n_1 到目的节点 n_p 的传输路径。 f_i 的数据包在 n_1 中生成并被分成 固定大小的数据段缓存在节点 n_1 的输出虚拟通道 缓冲区。若当前时隙为 f_i 的有效时隙且 f_i 优先权 最大,则 f_i 数据段在 MAC 获得发送权。其数据段 经组帧操作后,通过物理链路 l_1 传输至路由器 r_1 的端口 port_{u-1}并放置在该端口相应输入 VC 中。 r_1 接收到新的数据包后,首先进行包头解析,然后通 过查找路由表得到输出端口 port_u,再通过 VC - VN 映射表找到输出虚拟通道。最终, r_1 中相应输入 VC 和输出 VC 之间通过交叉开关建立起连接。数 据通过虫孔路由机制交换至指定输出端口的相应 输出 VC。 f_i 通过 l_2 到达 r_2 以类似方式继续在网 络中传输,直至到达 n_p 的指定输入 VC。

1.3 网络确定性调度问题分析

确定性传输是指通过配置网络资源,确保数据流在截止时间内到达目标节点^[14]。令 $C_i(C_i > 0)$ 为数据流 f_i 的数据包完成一次端到端传输必须满足的截止时间, T_{f_i} 为数据包在网络中的实际传输延时,则 SpaceFibre 网络确定性调度可表达为:

$$T_{f_i} \leq C_i, \forall i \in [0, M-1]$$
(1)

根据网络数据流传输模型可知:当无冲突调度时,*f*_i数据包在网络中的实际传输延时*T*_f为:

$$T_{f_i} = t_{\rm Q}^i + \sum_{j=1}^{n_i} (t_{\rm T}^i + t_{\rm H})$$
(2)

式中: h_i 为 f_i 传输路径上的路由器数目, t_T 为数据 包的物理链路传输延时, t_Q 为末尾数据帧在 MAC 中的排队延时, t_H 为路由器处理包首的时间。

令 V_{link} 为 SpaceFibre 网络单通道物理链路传输速率,r 表示 SpaceFibre 网络的物理链路数目,p为广播通道带宽占链路带宽的比例, L_{f}^{i} 表示 f_{i} 数据帧长度,则数据帧通信链路传输延时 t_{f}^{i} 为:

$$t_{\rm T}^{i} = L_{\rm f}^{i} / (1 - p) r V_{\rm link}$$
(3)

 f_i 的有效时隙仅允许 f_i 及与 f_i 无资源冲突的数据流发送数据。此时数据流 f_i 的末尾数据帧在 MAC 中的平均排队延时为:

$$t_{\rm Q} = t_{\rm R} + t_{\rm W}^{\iota} \tag{4}$$

式中,*t*_R为当前时隙正在传输的数据包的剩余发送时间,*t*_w为有效时隙等待时间。

令时帧 $T_{\rm F}$ 中的时隙数为 L,则时隙长度 τ 为: $\tau = T_{\rm F}/L$ (5)

若数据流 f_i 的数据包长度表示为 L_{pk}^i , L_{fmax} 为 SpaceFibre 网络中最大数据帧长度,数据流 f_i 最 大有效时隙间隔为 $v_{f_i}^{max}$ 。则在 $L_{pk}^i \leq L_{fmax}$ 情况下, 末尾数据帧的最大有效时隙等待间隔 $t^{i}_{W_{max}}$ 为 $2v^{max[10]}_{f_{i}}$ 。当 $L^{i}_{pk} > L_{fmax}$ 时,末尾数据帧最大有效时 隙等待间隔 $t^{i}_{W_{max}} = 2v^{max}_{f_{i}} (L^{i}_{pk}/\tau V_{link})$ 。因此,考虑 数据包长度因素影响的 $t^{i}_{W_{max}}$ 为:

$$t_{W_{\text{max}}}^{i} = 2v_{f_{i}}^{\text{max}} \lceil L_{pk}^{i} / \tau V_{\text{link}} \rceil$$

$$(6)$$

通过 $t^i_{W_{max}}$ 可以计算 f_i 数据包在最坏情况下的 传输延时 $T^{worst}_{f_i} \ge T_{f_i} \circ$

2 SpaceFibre 确定性调度算法设计

2.1 星载数据网络数据流分类

星载数据网络中的数据流类型一般可以分为 控制类业务和数据类业务。数据类业务主要是各 有效载荷生成的科学数据。控制类业务包含控制 指令、全局网络时钟信号、工程参数以及报告类数 据。其中,工程参数包含设备的运行状态和工作 参数,报告类数据是指星载智能设备的程序运行 状态。星载数据网络中,主要以数据传输延时、带 宽和可靠性衡量数据流服务质量。如表2所示, 不同数据流的 QoS 要求不同^[19-20]。控制类数据 流带宽需求较低,实时性和可靠性要求较高。有 效载荷科学数据 QoS 需求差异较大。

表 2 星载数据网络 QoS 需求

Tab. 2 QoS requirements of onboard data-handling network

粉铝米型	QoS 需求							
致16天空	延时	带宽	可靠性					
智能控制	高(异步)	低	青同					
实时控制	高(周期)	低	声同					
时钟	高(周期)	低	声同					
工程参数	高(周期)	低	声同					
报告	高(异步)	低	声同					
科学数据	低或高(异步)	低或高	低或高					

根据服务质量需求,星载数据网络中的数据 流可被划分为周期数据流、异步数据流和载荷数 据流三类。

周期数据流为延时和可靠性要求较高但带宽 需求较低的周期性业务,可表示为 $P_i = (\delta_i, \varphi_i, \sigma_i, E_{P_i}, \rho_i)$ 特征五元组。其中: δ_i 为周期数据生成 频率; φ_i 为周期数据每次进行传输的数据大小, 单位为Byte; σ_i 为毫秒级截止时间; E_{P_i} 为 P_i 的网 络链路集合; ρ_i 为周期数据流的优先级。

延时要求和可靠性要求较高的非周期性数据 为异步数据流 $A_i = (\beta_i, \gamma_i, \sigma_i, E_{A_i}, \rho_i)$ 。其中, β_i 为异步数据生成速率,单位为 Mbit/s; γ_i 为异步数 据流的数据包大小,单位为 Byte; E_{A_i} 为 A_i 的网络 链路集合。

载荷数据流则为延时需求较低的高带宽非周 期性数据,记为 $D_i = (\beta_i, \gamma_i, E_{D_i}, \rho_i)$ 。其中, β_i 为 载荷数据生成速率, γ_i 为载荷数据流数据包大 小, E_{D_i} 为载荷数据流物理链路集合, ρ_i 为载荷数 据的优先级。

2.2 扩展时隙及其上界

根据 SpaceFibre 网络确定性调度问题描述和 星载网络数据流特征可知, 网络中时帧长度 T_F 是 由周期数据 P_i 的采样频率 δ_i 决定的。假设网络 中共包含 K 个周期数据流且采样频率分别为 δ_0 , $\delta_1, \dots, \delta_{K-1}$,则 CFLDS 算法的 T_F 为每个周期数据 采样周期的最小公倍数:

$$T_{\rm F} = lcm(\delta_0^{-1}, \delta_1^{-1}, \cdots, \delta_{K-1}^{-1})$$
(7)

SpaceFibre 协议规定时隙数目 L = 64。根据 式(5)得:当 L 为 64 时,若 T_F 过大,则时隙长度 τ 显著增加,易造成有效时隙不能被完全利用的问 题。为提高有效时隙利用率,CFLDS 引入扩展时 隙,允许时隙数目满足:

$$L = 64m, m \in N^+ \tag{8}$$

时隙数为 L 的 CFLDS 算法记为 CFLDS – L_{\circ}

根据式(3)可知,当 $L_f = L_{fmax}$ 时,则 $t_{T,max}^i$ 为最大数据帧在单通道物理链路上的传输延时。由式(2)得最大数据帧在网络中的最长传输时间为:

$$T_{\rm fmax} = \max_{i} \left[t_{\rm Q}^{i} + \sum_{j=1}^{h_{i}} \left(t_{\rm T,max}^{i} + t_{\rm H} \right) \right] \qquad (9)$$

若完整数据帧从源节点到目的节点的传输时 间大于 τ,则在单个有效时隙内数据帧无法完成 传输并缓存在路由器的 VC 中,进而消耗较多缓 存资源且引入较大排队延迟。因此 CFLDS 算法 中将时隙长度 τ 约束为:

$$\tau \ge T_{\text{fmax}} \tag{10}$$

由此可得 m 的上界 m_{max}为:

$$m_{\rm max} = \lfloor T_{\rm F} / 64 T_{\rm fmax} \rfloor \tag{11}$$

2.3 无冲突均匀调度

设数据流 f_i 的二进制时帧调度向量 s_i 如式(12)所示,其中 $s_{i,j} \in \{0,1\}$ 。

$$\boldsymbol{s}_{i} = (s_{i,1}, s_{i,2}, \cdots, s_{i,L})$$
(12)

则 CFLDS 算法中周期数据流 P_i 时帧调度向量 s_i 中的有效时隙数为:

$$H_{P_i} = \sum_{j=1}^{L} s_{i,j} = T_{\rm F} \delta_i$$
 (13)

相应的有效时隙间隔为:

$$v_{P_i} = \lfloor L/H_{P_i} \rfloor \tag{14}$$

标准化期望带宽 *F*_{Ai},*Di* 指 VC 分配带宽占链路 总带宽的比例,可为虚拟通道中的数据流提供预 留带宽。异步数据 *Ai* 和载荷数据 *Di* 的 *F*_{Ai},*Di* 为:

$$F_{A_i,D_i} = \beta_i / (1-p) r V_{\text{link}}$$
(15)

设链路在时帧 $T_{\rm F}$ 内的总带宽为 $B_{\rm total}$, f_i 在 $T_{\rm F}$ 内分配带宽为 B_i ,则分配给 f_i 的带宽比 R_i 为:

$$R_{i} = B_{i}/B_{\text{total}} = L^{-1} \sum_{j=1}^{L} s_{i,j}$$
(16)

令 $F_{A_i,D_i} = R_i^{[10]}$,得 CFLDS 异步数据流和载 荷数据流时帧调度向量的有效时隙数为:

$$H_{A_i,D_i} = \sum_{j=1}^{L} s_{i,j} = \left\lceil L\beta_i / (1-p) r V_{\text{link}} \right\rceil \quad (17)$$

假设异步数据 A_i 首个有效时隙位于第 $j(j \in [1,L])$ 列,则在 CFLDS 算法中异步数据流剩余 有效时隙在L - (j-1)个时隙中均匀分布。 A_i 有 效时隙间隔 $v_{A_i}^a \pi v_{A_i}^b$ 为:

$$v_{A_i}^a = \lfloor L - (j-1)/H_{A_i,D_i} \rfloor$$
(18)

$$v_{A_i}^b = \left\lceil L - (j-1)/H_{A_i,D_i} \right\rceil \tag{19}$$

令"\"表示求余符号,则相应有效时隙数目 H^a₄和 H^b₄分别为:

$$H_{A_i}^a = H_{A_i, D_i} - b_{A_i}$$
(20)

$$H_{A_i}^b = \left[L - (j-1) \right] \setminus H_{A_i, D_i}$$
(21)

2.4 算法流程及正确性证明

CFLDS 算法如算法 1 所示。根据 SpaceFibre 星载数据网络服务质量机制和数据流传输模型, 给出以下定义。

定义1 在有向连通图 G 中,数据流 f_i 与数据 流 f_j 占用网络物理链路集合分别为 E_{f_i} 和 E_{f_j} 。若 $E_{f_i} \cap E_{f_j} = \emptyset$,则称数据流 f_i 与数据流 f_j 是可兼容 的。特别地,数据流 f_i 与其本身也是可兼容的。与 f_i 可兼容的所有数据流集合,称为数据流 f_i 的可兼 容流集合(compatible flow set, CFS),记为 $C(f_i)$ 。

定义2 若时隙 $j(j \in [1,L])$ 是数据流 f_i 的有效时隙,则称时隙 j 包含数据流 f_i 。时隙 j 包含的全部数据流构成的数据流集合称为时隙 j 的包含数据流集(included flow set, IFS),记为 $I(ts_j)$ 。

定义3 若 $I(ts_j) \subseteq C(f_i)$,则称时隙 j 为数据 流 f_i 的可用时隙。数据流 f_i 的所有可用时隙按时 隙号递增顺序构成的有序集合为 f_i 的可用时隙集 (available time-slot set, ATS),记为 $A(f_i) \circ A(f_i)$ 中的首个元素称为 f_i 的首个可用时隙(first available time-slot, FATS),记为 $j_{F(f_i)} \circ$

算法1 分类细粒度低延时确定性调度

Alg. 1 CFLDS

输入:M条数据流特征元组、路由器处理包首的时间 $t_{\rm H}$ 、扩展时隙上界 $m_{\rm max}$ 、广播通道带宽比 p 和 $V_{\rm link}$ 输出:各数据流时帧调度向量 s_i 1. 按优先级值递增次序排列数据流 2. 计算 $T_{\rm F}$; L = 64m, m = 1, k = 03. initial(void) 4. while k < M5. if $f_i 是 P_i$ $flag = periodic(\delta_i, \varphi_i, \sigma_i, E_{P_i}, \rho_i)$ 6. else if $f_i \not \models A_i$ flag = aperiodic $(\beta_i, \gamma_i, \sigma_i, E_{A_i}, \rho_i)$ 7. $flag = payload(\beta_i, \gamma_i, E_{D_i}, \rho_i)$ else 8. end if 9. if flag = = TURE, k = k + 110. else k = 0, m = m + 1, initial(void) 11. 12. if $m > m_{\max}$ break 13. end if 14. end if 15. end if 16. end while 17. def initial void //初始化函数定义 18. for i = 0; i < M; i + +19. if i = = 0, $s_0 = (1, 1, \dots, 1)$ 20. else $s_i = 0$ 21. end if end for 22 23. end def initial 24. def periodic $(\delta_i, \varphi_i, \sigma_i, E_{P_i}, \rho_i)$ 25. 查找 $j_{F(f_i)}$ if $j_{F(f_i)} \leq L$ 26. 27. 按间隔 v_{Pi}放置 H_{Pi}个有效时隙 28. if 有效时隙 $\notin A(f_i)$ 29. $s_i = 0, j_{F(f_i)} = next(j_{F(f_i)})$ 30. 执行步骤25 31. else return TURE end if 32. else return FALSE 33 34. end if 35. end def periodic 36. def aperiodic $(\boldsymbol{\beta}_i, \boldsymbol{\gamma}_i, \boldsymbol{\sigma}_i, \boldsymbol{E}_{A_i}, \boldsymbol{\rho}_i)$ 37. if $j_{F(f_i)} \leq L$ 38. 间隔 $v_{A_i}^a$ 放置 $H_{A_i}^a$ 个有效时隙 39. 间隔 $v_{A_i}^b$ 放置 $H_{A_i}^b$ 个有效时隙 40. if 有效时隙 $\notin A(f_i)$ 41. 查找距离该有效时隙位置最近的可用时隙 并替代该有效时隙 42. end if if $T_{f_i}^{\text{worst}} \leq C_i$ return TURE 43. 44. else return FALSE 45. end if 46. else return FALSE 47. end if 48. end def aperiodic 49. def payload $(\beta_i, \gamma_i, E_{D_i}, \rho_i)$ 50. if $number(A(f_i) < H_{A_i,D_i})$ return FALSE 51. else

52. 在 $A(f_i)$ 中置位 H_{A_i,D_i} 个有效时隙

54. end if

55. end def payload

CFLDS 算法根据数据流特征元组对网络中 不同类型的数据流进行有效时隙分配。函数 periodic 为周期数据流确定性调度方法,非周期性 数据流调度方案对应函数 aperiodic,函数 payload 为载荷数据确定性调度方法。CFLDS 算法复杂 度取决于数据流数目 M 和时隙数目 L。给定 SpaceFibre 网络,则 M 为定值。随着 L 的增大,复 杂度增加,但相应时帧调度向量的延时和抗抖动 的优化性也越高。在实际任务应用中,时隙数目 的取值应在网络延时特性需求、算法复杂度和系 统时钟精度之间进行权衡。

证明 CFLDS 算法的正确性:若算法循环结束 时,时隙数目不超过其上界,则该算法可以实现网 络中所有数据流的确定性传输。

定理1 若算法结束时有 $m \leq m_{\text{max}}$,则 $\forall i \in [0, M-1], T_{i} \leq C_i$ 均成立。

证明:若算法循环结束时有 $m \leq m_{max}$,则假设 $\exists i \in [0, M-1]$,使得 $T_{f_i} > C_i(C_i > 0)$ 。下面根据 数据流 f_i 类型,对算法正确性进行讨论。

1)该 f_i 为周期性数据流 P_i 。若 $T_{P_i} > C_i$,则 $\tau v_{P_i} - 1/\delta_i > C_i$ 。由式(13)和式(14)得: $1/\delta_i \ge$ τv_{P_i} ,则 $\tau v_{P_i} - 1/\delta_i < 0$,与 $C_i > 0$ 矛盾。

2)该 f_i 为非周期性数据流 A_i 。若算法结束 时有 $m \leq m_{max}$,则k < M,有 $T_{f_i}^{\text{vorst}} \leq C_{f_i}$ 。又 $T_{f_i}^{\text{vorst}} \geq T_{f_i}$,则 $T_{f_i} \leq C_i$,与 $T_{f_i} > C_i$ 矛盾。

3)该 f_i 为载荷数据流 D_i 。根据载荷数据流 定义可知,对任意载荷数据流 $T_{f_i} \leq C_i$ 成立,与 $T_{f_i} > C_i$ 矛盾。 □

3 仿真与分析

3.1 仿真与验证

参照 SpaceFibre 网络典型应用场景^[20],构建 图 3 所示双路由 SpaceFibre 星载数据网络仿真模 型,图中 r_1 和 r_2 为八端口路由器,各端口包含输入 VC 和输出 VC 各 8 条。为简化网络,图 3 只画出 了与数据流相关的虚拟通道和物理链路。节点 n_1 和 n_2 为 SpaceFibre 设备。SpaceWire 设备通过转 换桥节点 n_3 连接到 SpaceFibre 网络不同 VC 上。 节点 n_4 为大容量存储设备, n_5 为下行链路终端, n_6 为控制终端。仿 真模型中物理链路 V_{link} 为 2.5 Gbit/s单向单通道,广播通道预留带宽为链路 带宽的 10%,路由器处理包首的时间为 0.5 μ s^[21]。



图 3 双路由 SpaceFibre 网络仿真模型 Fig. 3 Simulation model of the dual-route SpaceFibre network

图 3 中共包含 9 条数据流 f_i ($i \in [0,8]$),虚 线为 $f_0 \cong f_8$ 的传输路径。VN₀ 用于载荷控制终 端 n_6 从各节点收集控制数据流 f_0 。根据实际任 务需求^[10,11,17-18],构建如表 3 所示的网络数据流 特征。

OPNET 中没有适用于 SpaceFibre 标准的模 块,为验证算法正确性在 OPNET Mdeler 14.5 平 台下自行搭建该仿真模型。以转换桥节点 n₃ 为 例对节点仿真模型设计进行说明。如图 4 所示, 该 OPNET 模型包含数据包源、数据帧、输出 VC、 MAC 和发射机五个模块。src 模块为数据包源, 仿真过程中周期数据流的数据包到达间隔为 δ_i^{-1} ,异步和载荷数据流的数据包符合到达速率为 β_i 的泊松过程^[22]。数据包经数据帧模块 split_pk 被分割为数据帧并存储在相应输出 VC 缓冲区 queue0~queue4 中。MAC 根据各数据流的时帧 调度向量进行仲裁,数据最终通过发射机传输到 SpaceFibre 网络。

图 5 为路由器 r₁ 仿真模型设计,接收机模块 rx 从相应发射机中接收数据帧,经对应输入数据 流整形器模块 proc_rx 传输至相应输入 VC 进行 缓存。虫孔路由开关模块 proc_router 根据接收到 Tab. 3

表 3 网络数据流特征 Characteristics of each data stream in the network

编号	类型	VN 号	特征元组
f_1	A_1	VN_1	$(1\ 000, 125\ 000, 1\ 000, \{l_1, l_5, l_6\}, 1)$
f_2	A_2	VN_2	$(480,256,5,\{l_2,l_5,l_6\},3)$
f_3	P_3	VN_3	$(4,64,1,\{l_2,l_4,l_8\},2)$
f_4	A_4	VN_4	$(400,256,10,\{l_3,l_5,l_6\},5)$
f_5	A_5	VN_5	$(120,256,12.7,\{l_3,l_5,l_6\},4)$
f_6	D_6	VN_6	$(200,256, \{l_3, l_5, l_6\}, 7)$
f_7	P_7	VN_7	$(32, 32, 1, \{l_3, l_5, l_6\}, 2)$
f_8	D_8	VN_8	$(200, 256, \{l_7, l_8\}, 6)$



图 4 网络节点仿真模型 Fig. 4 Simulation model of the node



图 5 网络路由器仿真模型 Fig. 5 Simulation model of the router

的包头进行路由解析和 VC - VN 映射,将指定端 口输入 VC 的数据帧交换至相应输出端口的输出 VC。按照虫孔路由规则,输出虚拟通道未接收到 完整数据包时,保持对本 VC 的占用。输出 VC 数 据帧在 MAC 获得数据发送权后,通过相应发射机 继续传输。

3.2 结果与分析

为验证算法有效性,修改文献[17]中 CFCS 算 法使其符合 SpaceFibre 网络。在 OPNET 网络仿真 模型中观察 CSBP、CFCS、CFLDS - 64、CFLDS -256、CFLDS - 1024 和 CFLDS - 4096 六种调度机 制下网络传输的确定性。图6为不同机制下对截 止时间敏感的周期和异步数据流的确定性传输评 估图,横坐标为数据流编号,纵坐标为数据流最大 端到端延时占相应截止时间的比例。观察图6可 知:CSBP 算法中仅高优先级数据流 f_1 以及与 f_1 可兼容的数据流 f, 满足截止时间要求, 非C(f₁) 元素的低优先级数据流的传输延时超出可接受范 围;CFCS并未显著改善相应低优先级数据流的 最大端到端延时;在不同时隙数目的 CFLDS 算法 中,时间敏感数据流的最大端到端延时均小于相 应截止时间。在 CSBP 算法中,fi 长期占用链路 资源导致相应低优先级数据流的传输延时超出截 止时间。在一定时间段内, CFCS 算法仍存在链 路资源被方 独占的问题,所以该算法相应最大端 到端延时的改善程度有限。CFLDS 算法均匀分 布有效时隙,可均衡分配链路资源,进而有效降低 最大端到端延时。因此, CFLDS 可实现 SpaceFibre 网络数据流的确定性传输。



图 6 数据流最大端到端延时与截止时间比例 Fig.6 Percentage of the maximum delay out of the deadline

为分析算法平均延时特性,比较表4中同一 数据流在不同调度机制下的平均端到端延时。 分析表4可知:除数据流 f_1 和 f_3 ,CFCS和CFLDS 调度机制中各数据流的平均延时相比于CSBP 均呈下降趋势;时隙数目为64时,各数据流在 CFLDS-64调度机制下的平均延时不大于 CFCS;除 f_1 、 f_3 外,各数据流在CFLDS-64、 CFLDS-256、CFLDS-1024和CFLDS-4096机 制下的平均延时依次降低。CFLDS-64有效时 隙的分布具有很好的均匀性,降低了有效时隙 等待时间,进而减少了数据包的平均排队时间, 所以 CFLDS - 64 中除 f₁ 外的各数据流平均端到 端延时相比 CFCS 均降低。由式(5)知, T_F 一定 时,随着时隙数目 L 的增加,时隙长度 τ 减小。τ 的减小降低了等待空闲时隙结束的时间,减少 了平均排队延时,所以 CFLDS 算法的平均端到 端延时随着时隙数目的增加而减少。因此,引 入扩展时隙可在更细粒度上分配网络资源,提 高时隙利用率,减少有效时隙等待时间,降低平 均延时。

表4 不同调度机制下网络流量平均端到端延时与抖动特性

Tab. 4 Characteristics of average end-to-end delay and jitter under different scheduling mechanisms

数据												
	CSBP		CFCS		CFLDS – 64		CFLDS – 256		CFLDS - 1024		CFLDS - 4096	
流	平均延	抖动/	平均延	抖动/	平均延	抖动/	平均延	抖动/	平均延	抖动/	平均延	抖动/
0.0	时/ms	ns	时/ms	ns	时/ms	ns	时/ms	ns	时/ms	ns	时/ms	ns
f_1	400.8	5.99×10^{-4}	980.26	2 260	985.36	9.02×10^4	993.86	6.03	996.56	4.51	997.84	1.25
f_2	61.81	1.27×10^{7}	12.54	497	1.258	5.56×10^{4}	0.825	386	0.565	100	0.298	97.9
f_3	0.003	5.11×10^{-5}	0.002	2.31×10^{-5}	0.002	4.47×10^{-9}	0.002	1.4×10^{-16}	0.002	1.4×10^{-16}	3.993	1.4×10^{-16}
f_4	109.4	2.65×10^{7}	13.05	4 340	2.889	6.01×10^{4}	2.191	1 710	1.136	1 080	0.390	152
f_5	81.53	2.04×10^{7}	14.76	7 250	4.239	7.73×10^{4}	1.341	545	0.719	242	0.436	171
f_6	149.8	4.82×10^{7}	13.41	2.64×10^{4}	6.999	6.92×10^{4}	4.287	6740	3.752	4 870	2.614	3 360
f_7	50.71	1.11×10^{7}	12.99	1.1×10^{-13}	0.492	0	0.117	$2.7\mathrm{e}\times10^{^{-14}}$	0.024	0	0.002	0
f_8	0.003	8.21×10^{-5}	2.406	2 060	2.406	2 060	0.998	290	0.630	198	0.297	71.5

为深入分析算法抗抖动特性,分析表4中各 数据流在不同调度机制下的抖动数据。CSBP 调 度机制下,非 $C(f_1)$ 元素的数据流抖动较大。对 比 CFLDS - 64 算法与 CFCS 算法可知, CFLDS – 64 中数据流 f_7 和 f_8 的抖动不大于 CFCS,其余数据流的抖动较高。由于异步数据流 的数据包到达间隔服从泊松过程,CFLDS-64中 数据包有效时隙等待时间的差异较大,所以 CFLDS-64的抗抖动特性较 CFCS 有待提升。结 合平均延时分析结果可知,CFLDS-64 延时性能 优于 CFCS,但 CFCS 的抗抖动特性略优。比较 表4中不同时隙数目的 CFLDS 算法可知:随着时 隙数目的增加,各数据流的抖动降低;在CFLDS-4096 中,各数据流抖动相比于 CFCS 均下降 90% 以上。当时帧长度一定时,时隙数目的增加导致 时隙长度的缩短,进而缩小了有效时隙等待时间 的差异。因此,扩展时隙可以更好地规划和配置 网络资源,降低网络的延时抖动。

为评估算法吞吐量性能,分析图 7 所示 CSBP、CFCS、CFLDS - 64、CFLDS - 256、CFLDS - 1024 和 CFLDS - 4096 六种调度机制下的网络吞 吐量。观察可知, CFCS 吞吐量小于 CFLDS - 64。 随着时隙粒度增加, CFLDS - 256、CFLDS - 1024 和 CFLDS - 4096 调度机制下的网络吞吐量不断 提高。可见, CFLDS 在改善延时和抖动特性的同 时,能够保证网络的吞吐量性能。





4 结论

为保证 SpaceFibre 网络中高速数据传输的实时性和可靠性,本文提出了分类细粒度低延时调度 CFLDS 算法。该算法将数据流分为周期、异步

和载荷数据流三类,引入扩展时隙,综合考虑网络 拓扑结构,生成均匀二进制时帧调度向量。通过 在 OPNET 仿真平台中搭建双路由 SpaceFibre 网 络仿真模型,验证了算法的有效性。仿真结果表 明:相比 CSBP 和 CFCS 算法,CFLDS 实现了时间 敏感数据流的确定性传输;当时隙数目均为 64 时,CFLDS 算法平均延时明显低于 CFCS,抗抖动 性能优势较小;随着时隙数目的增加,CFLDS 算 法平均延时和抖动均显著降低。因此,该算法可 为航天工程中的低延时确定性 SpaceFibre 网络的 设计提供理论依据。

参考文献(References)

- SLEASMAN T, BOYARSKY M, PULIDO-MANCERA L, et al. Experimental synthetic aperture radar with dynamic metasurfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6864 – 6877.
- [2] ROSENBERGER M, CELESTRE R. Smart multispectral imager for industrial applications [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, 2016: 7 – 12.
- [3] ECSS. SpaceWire-links, node, routers and networks: ECSS-E-ST-50-12C[S]. Noordwijk: ESAESTEC Requirements & Standards Division, 2008.
- [4] ECSS. Space engineering: SpaceFibre, very high-speed serial link: ECSS-E-ST-50-11C [S]. Noordwijk: ESAESTEC Requirements & Standards Division, 2019.
- [5] PARKES S, FLORIT A F, VILLAFRANCA A G. SpaceFibre interfaces and architectures [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2019: 1-8.
- [6] 王恒,朱元杰,杨杭,等. 基于优先级分类的工业无线网 络确定性调度算法[J]. 自动化学报,2020,46(2): 373-384.

WANG H, ZHU Y J, YANG H, et al. Deterministic scheduling algorithm with priority classification for industrial wireless networks [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(2): 373 - 384. (in Chinese)

 [7] 姚锋,罗启章,朱燕麒,等. 基于随机搜索策略的中继卫 星调度方法[J]. 国防科技大学学报,2020,42(5): 136-142.
 YAO F, LUO Q Z, ZHU Y Q, et al. Scheduling method for

tracking and data relay satellites based on stochastic search strategy [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(5): 136 – 142. (in Chinese)

[8] 刘扬,魏蔚,张伟哲.随机需求下面向异质费用的云资源 调度算法[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(11): 116-121.

LIU Y, WEI W, ZHANG W Z. Heterogeneous cost oriented cloud resource scheduling algorithm for stochastic demand[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(11): 116-121. (in Chinese)

[9] KHAKHULIN A, ORLOVSKY I, SHEYNIN Y, et al. Real time video data transmission in SpaceFibre networks with the ESDP transport protocol [C]//Proceedings of International SpaceWire Conference, 2018 ± 200 – 208.

- [10] 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 X S, WANG J X, JIANG M R, et al. Research on realization of quality of service for SpaceFibre onboard networks[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(2):207-214. (in Chinese)
- [11] 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, 2018: 1-6.
- [12] 郑静雅,安军社. SpaceFibre 网络服务质量时隙资源分配 算法[J]. 国防科技大学学报,2021,43(2):74-83.
 ZHENG J Y, AN J S. Time-slot allocation algorithm of quality of service for SpaceFibre[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021,43(2):74-83. (in Chinese)
- [13] RASZHIVIN D, SHEYNIN Y, ABRAMOV A. Deterministic scheduling of SpaceWire data streams [C]//Proceedings of the 5th International SpaceWire Conference, 2013: 141-144.
- [14] OLENEV V, PODGORNOVA E, LAVROVSKAYA I, et al. Deterministic services for SpaceWire networks: SpaceWire networks and protocols, long paper [C]//Proceedings of International SpaceWire Conference, 2016: 1 – 8.
- [15] 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 R, YANG Y Z, WU J. Design of hybrid routing mechanism for SpaceWire networks [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(1): 78-85. (in Chinese)
- [16] OLENEV V, PODGORNOVA E, LAVROVSKAYA I. Protocol for deterministic data delivery in SpaceWire networks[C]// Proceedings of 18th Conference of Open Innovations Association and Seminar on Information Security and Protection of Information Technology (FRUCT-ISPIT), 2016: 233 – 240.
- [17] GIBSON D J. Deterministic SpaceWire networks [D]. Dundee: University of Dundee, 2017.
- [18] PARKES S, FLORIT A F, VILLAFRANCA A G, et al. SpaceFibre network and routing switch [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2017: 1-7.
- [19] OLENEV V. Analysis of requirements for modern spacecraft onboard network protocols [J]. Information and Control Systems, 2021 (1): 8-16.
- [20] NANNIPIERI P, FANUCCI L, SIEGLE F. A representative SpaceFibre network evaluation: features, performances and future trends[J]. Acta Astronautica, 2020, 176: 313 – 323.
- [21] 郭林. 基于 SpaceWire 的空间数据网络关键技术研究[D]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心, 2011.
 GUO L. Study on key technology of SpaceWire for on-board data bus network[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [22] KOROBKOV I. Queuing system for the SpaceFibre standard[C]// Proceedings of 22nd Conference of Open Innovations Association, 2018: 79 – 87.