

机载波分复用网络强实时性调度算法设计

黄 金 许 渤 凌 云 邱 昆

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要 与传统的商业网络不同,航空机载波分复用网络要求强实时性以保证消息的传输性能。实时调度算法是保证机载网络中消息传输性能的关键。针对机载波分复用网络的实时性要求,采用实时通信中的周期性任务模型,提出了满足机载波分复用网络实时性要求的加权轮转调度算法,其中轮转周期的选择、权值匹配方法和多信道分配方法是影响调度算法参数设计的重要过程。通过多信道分配方法有效减少了消息拆分次数;结合实例比较确定了算法中消息分配权值的计算方法;并指出了最优轮转周期无法保证最小的消息延迟时间率。研究结果对机载波分复用网络的工程设计与优化有一定的指导意义。

关键词 光通信;航空电子;实时调度;波分复用;多信道分配

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0406001

Design of Hard Real-Time Scheduling Algorithm in Avionic Wavelength Division Multiplexing Network

Huang Jin Xu Bo Ling Yun Qiu Kun

(Key Laboratory of Broadband Fiber Transmission and Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract Different from the commercial applications, the avionic wavelength division multiplexing (WDM) network lays much emphasis on hard real-time characteristics. The real-time scheduling algorithm is a key issue to ensure the message transmission performance. According to the real-time communication requirement of avionic WDM network and the traffic characteristics of the avionic network, a weighted round robin scheduling algorithm is proposed based on the periodic task model of real-time communication to guarantee hard real-time transmission in an airborne WDM network, which is comprised of the rotation cycle selection, weights assignment scheme and multi-channel allocation method. Among them, multi-channel allocation method efficiently reduces the splitting times of the message; combined with examples, message weights assignment scheme is determined and it is pointed out that the optimal rotation cycle cannot guarantee the minimum message delay ratio. Research results are meaningful for the design of real-time scheduling parameters and the current practice of avionic WDM network.

Key words optical communications; avionic; real-time scheduling; wavelength division multiplexing; multi-channel allocation

OCIS codes 060.2330; 060.4250; 060.6719; 350.4600

1 引 言

在未来5~10年,由于机载设备和传感数据处理的通信需求,机载网络的带宽要求将达10 Gb/s,达到小数据中心的容量^[1]。未来随着视频类应用的采用,

数据量将超过千万亿字节(10^6 GB)^[2]。然而,现有的光纤通道、全双工交换式以太网等局域网技术均不能同时满足急速增加的带宽需求、多业务并存传输的需求以及网络可扩展性和重构需求。波分复用

收稿日期: 2012-11-01; **收到修改稿日期**: 2012-12-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61101095)、中央高校基本科研业务费资助项目(ZYGX2011J009)和航空科学基金项目(20111931001)资助课题。

作者简介: 黄金(1984—),女,博士研究生,主要从事机载光网络方面的研究。E-mail: jinhuang1984@gmail.com

导师简介: 邱昆(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要进行光纤通信系统技术方面的研究。

E-mail: kqiu@uestc.edu.cn

(WDM)光网络具有高容量、多协议透明传输、网络结构灵活可升级、轻质、抗电磁干扰以及可重构和容错能力强等多种优点^[3],非常适合下一代航空机载网络。以波分复用为特征的先进光网络已经成为未来航空机载网络的技术选择目标^[4]。

与传统的电信网络和数据网络不同,机载网络要求强实时性以保证消息传输^[5]。实时性是机载网络的关键性能要求,因而保证机载波分复用网络的实时性十分必要。实时调度方法是保证机载网络消息传输性能的关键。然而,通常的网络调度算法往往侧重于研究调度的公平性、负载率和消息的平均延迟等特性,对实时性能的关注较少。基于轮询的加权轮转调度(WRR)算法以其较低的复杂度和高度执行性而非常适合具有强实时性要求的机载网络系统^[6]。在机载网络的设计中,通常需要在满足一定的实时性和可靠性的指标下,尽可能地提高传输有效性^[7,8]。与文献[9,10]以高信道利用率为目标的航电多信道实时调度算法的研究不同,本文从三个方面对多信道加权轮转调度算法进行了全面的研究。除了考虑信道利用率外,还研究了不同的参数设计对更多的网络性能指标的影响,如消息的最大延迟等,并对两种典型的权值分配方法进行了性能比较,针对多信道的应用环境,分析了如何在多信道分配方法中考虑无消息分拆的约束条件,提出了相应的解决方法。

2 实时调度模型

2.1 消息模型

在航空机载网络中,消息按其类型可分为周期消息和非周期消息。消息的格式和长度都是固定的,且大部分为周期消息,非周期消息也可以确定其发送的最小时间间隔^[11]。假设机载网络系统中有 n 条实时消息流形成一个消息集 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$;采用实时通信中的周期性任务模型,则每条消息流可由一个四维数组表示, $S_i = (C_i, P_i, D_i, \phi_i)$;其中 C_i 为消息流最大长度, P_i 为消息流的发送周期,对于非周期消息,则表示消息产生最小时间间隔^[6,11], D_i 为消息流的最大允许延迟时间,一般取 $D_i = P_i$, ϕ_i 表示消息流进入系统时刻,消息流产生周期 P_i 的最小值用 P_{\min} 表示。消息流负载率表示为 $U_i = \frac{C_i}{P_i}$;网络总负载率为 $U = \sum_{i=1}^n U_i$ 。

2.2 消息调度模型

在航空电子系统中,雷达、电子战(EW)以及通信-导航-识别(CNI)等不同种类的机载设备进行周期性数据的采集等,由机载设备采集的信号经航空电子应用程序产生相应的消息^[5]。强实时信道组 $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$ 采用轮转调度的方式服务于周期性任务模型中的各消息,如图 1 所示。

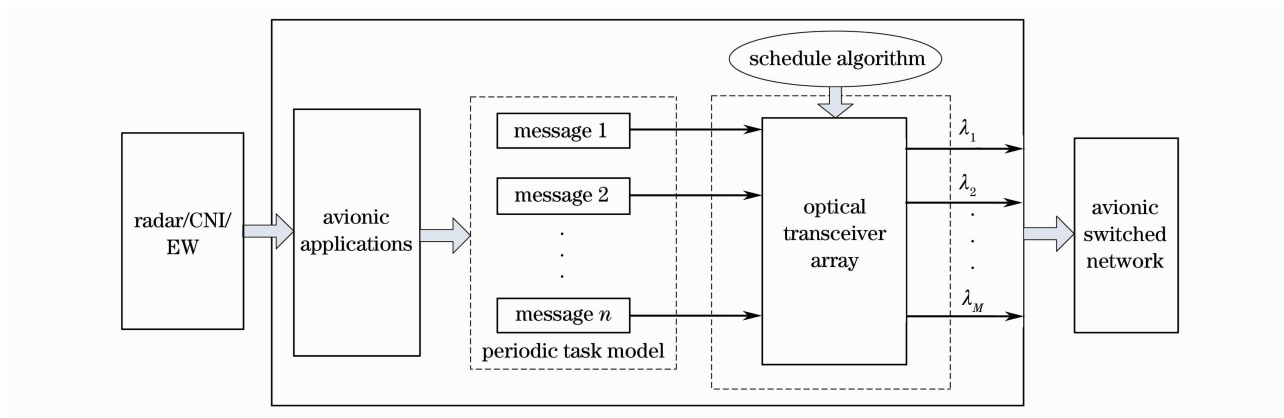


图 1 消息调度模型

Fig. 1 Message scheduling model

2.3 实时调度轮转约束条件

在强实时条件下,若调度算法为消息 i 分配的权值 w_i 满足以下两个条件即可实现消息的强实时调度。

1) 轮询权值约束条件,

$$\sum_{i=1}^n w_i \leq MT_{RL}, \quad (1)$$

式中 T_{RL} 为信道轮转周期, M 为强实时信道数目, T_{RL} 取值小于 P_{\min} , 且为正整数。

2) 时限约束条件。

对于任意时间间隔 t , $X_i(t)$ 表示消息 i 发送的最小时间量,

$$X_i(t) = \left\lfloor \frac{t}{T_{RL}} \right\rfloor \omega_i. \quad (2)$$

消息集合 S 中每条消息在其最大允许延迟时间内有足够发送该消息的时间,即满足

$$X_i(P_i) \geq C_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

2.4 WDM 实时轮转调度算法

WDM 实时轮转调度算法步骤为

- 1) 确定信道轮转周期 T_{RL} ;
- 2) 保证实时情况下,根据权值分配方法分别计算每条消息在每轮调度中需要分配的权值 ω_i ;
- 3) 计算系统所需信道资源;
- 4) 根据多信道分配策略将权值分配到不同的信道资源上;
- 5) 依据以上参数进行消息发送。

在 WDM 实时加权轮转调度算法中,信道轮转周期的选择、权值分配方法和多信道分配策略是算法设计中三个最重要的过程,其对调度算法性能的影响将在下节进行详细分析。

3 参数设计

强实时轮转调度中,轮转调度周期的选择是影响系统实时传输性能的关键之一。权值分配方法决定了消息分配权值的大小,并直接影响系统所需分配信道资源数目。消息拆分将不利于系统对消息的管理,这里提出的多信道分配策略在尽量减小拆分次数的前提下,实现各信道负载率的均衡。

3.1 权值分配方法

为保证消息发送的实时性,单信道 WRR 算法中消息 i 分配的权值通常取 $\omega_i = \left\lceil \frac{C_i}{\lfloor P_i/T_{RL} \rfloor} \right\rceil$ ^[6,12,13]。这里分别取 $\omega_i = \left\lceil \frac{C_i}{\lfloor P_i/T_{RL} \rfloor} \right\rceil$ (方法 1) 和 $\omega_i = \left\lfloor \frac{C_i T_{RL}}{P_i} \right\rfloor$ (方法 2)^[10]。

当 $\omega_i = \left\lceil \frac{C_i}{\lfloor P_i/T_{RL} \rfloor} \right\rceil$ 时,易得对应任意 i , $X(P_i) = \lfloor P_i/T_{RL} \rfloor \omega_i = \lfloor P_i/T_{RL} \rfloor \left\lceil \frac{C_i}{\lfloor P_i/T_{RL} \rfloor} \right\rceil \geq \lfloor P_i/T_{RL} \rfloor \frac{C_i}{\lfloor P_i/T_{RL} \rfloor} = C_i$, 满足时限约束条件。同时,当信道资源数目 M 和轮转周期 T_{RL} 的选取满足轮询约束条件时可满足消息的实时发送。然而,由于轮转长度 T_{RL} 、消息周期 P_i 和消息长度 C_i 往往不成比例,这种权值分配方法在分配较大权值时会造成信道利用率率的下降。

当 $\omega_i = \lfloor C_i T_{RL}/P_i \rfloor$ 时,由于 $X(P_i) = \lfloor P_i/T_{RL} \rfloor \omega_i = \lfloor P_i/T_{RL} \rfloor \left\lfloor \frac{C_i T_{RL}}{P_i} \right\rfloor \leq \frac{P_i}{T_{RL}} \frac{C_i T_{RL}}{P_i} = C_i$, 不满足时限约束条件。也即消息 i 在周期 P_i 的消息发送时间会小于 C_i , 需要在补偿信道对其进行权值补偿。将权值分配不足部分集中到补偿信道的做法,大大提高了信道利用率,但同时增加了系统的复杂度。

3.2 轮转周期 T_{RL} 的选择

不妨设 $\omega_i^0 = \frac{C_i}{P_i/T_{RL}}$ 。由于 $\omega_i^0(P_i/T_{RL}) = C_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, 此时消息分配权值刚好满足消息在其周期内需要发送的消息长度。然而,这种权值分配方式不能保证消息分配的权值为整数。

定义轮转函数为

$$F(T_{RL}) = \left| \sum_{i=1}^n \omega_i - \sum_{i=1}^n \omega_i^0 \right| / T_{RL} = \left| \sum_{i=1}^n \omega_i - \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{P_i/T_{RL}} \right| / T_{RL}. \quad (4)$$

当 $F(T_{RL})$ 取最小值时,其对应的 T_{RL} 为在此权值分配方法下的轮转周期最优值。此时,消息分配的权值与 ω_i^0 相差最小,有效利用率最高。

3.3 多信道分配方法

在多信道权值分配过程中,当单一信道的剩余权值不足以提供消息预分配的权值时,就不可避免地需要进行消息拆分。然而,消息的拆分使得调度算法相对复杂,并且需要消息的排序重组技术。因此,应尽量减少消息拆分次数。普通的最先合适算法未考虑消息流拆分问题。这里提出一种多信道分配方法,该方法在遵循尽可能少的拆分次数的原则前提下,尽量平均每个信道的负载率。其分配方法如下。

1) 系统中所有的 msgID 组成一个消息 ID 集合。根据消息所对应的权值,将消息集合划分为尽可能多的权值和恰好等于轮询周期的互斥集。在同一互斥集内的消息分配到同一波长信道上。

2) 将剩余消息所分配权值和信道空闲带宽从大到小排序。依次选择剩余消息集合中权值最大的消息分配到空闲带宽最大的信道资源上去。若单个信道剩余带宽不足,则再进行消息流的拆分。每分配完一条消息,更新信道空闲带宽顺序。

4 仿真及性能分析

运用离散事件仿真方法建立机载光纤波分复用网络的消息实时调度模型,对消息集进行离散事件

仿真实验。结合实验,对以下三个性能指标进行分析:消息延迟特性、所需信道资源以及信道利用率。其中消息延迟特性包含每条消息对应的延迟时间及其对应的消息延迟时间率(最大和平均延迟时间率)。消息延迟时间率定义为消息实际传输延迟时间与消息的最大允许延迟时间的比率。最大延迟时间率和平均延迟时间率分别表示消息传输的最大延迟时间和平均延迟时间与消息最大允许延迟时间的比率。假设消息集合为

$$S = \{(C_i, P_i), i = 1, 2, \dots, 7\} = \{(4, 15), (5, 12), (5, 16), (10, 19), (7, 25), (14, 20), (7, 12)\}, \quad (5)$$

式中所有值以 slot 为单位,初始相位随机。

根据轮转函数定义和实时调度轮转约束条件,得到不同权值分配下的 F 函数和信道资源数目与 T_{RL} 的关系,如图 2、图 3 所示。

当采用权值分配方法 1 时,若 $T_{RL} = 6$,轮转函数最小值 $\min F(T_{RL}) = 0.7479$ 。此时系统所需的强实时信道资源数目为 $M = 4$ 。

当采用权值分配方法 2 时,若 $T_{RL} = 12$,轮转函数最小值 $\min F(T_{RL}) = 0.2521$ 。此时系统所需的强实时信道资源数目为 $M = 3$ 。

4.1 轮转周期对系统性能的影响

在调度算法采用权值分配方法 1 和提出的多信道分配方法的情况下,分别给出了 $T_{RL} = 6$ 和 $T_{RL} =$

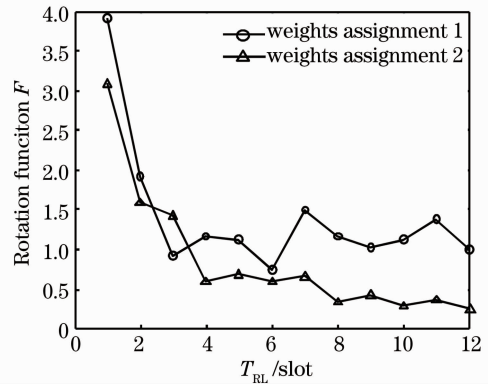


图 2 轮转函数 F 与 T_{RL} 关系

Fig. 2 Rotation function versus rotation cycle

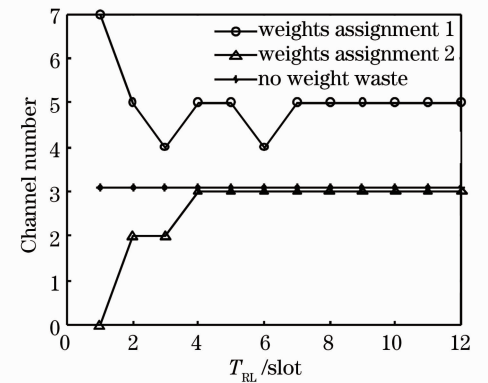


图 3 信道资源数目与 T_{RL} 关系

Fig. 3 Channel number versus rotation cycle

10 时的消息延迟及信道利用率,如图 4~6 所示。需要注意的是,当轮转周期为 10 时,需要使用 5 个信道。

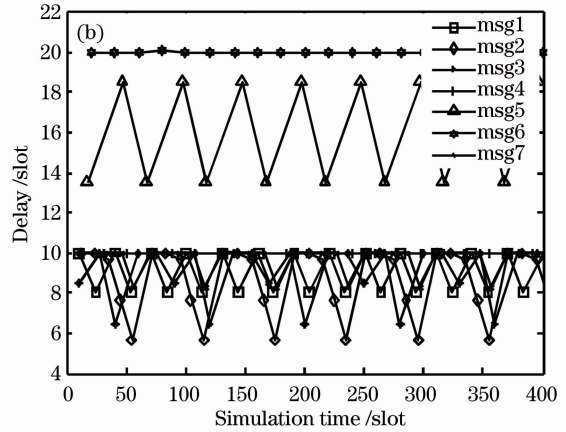
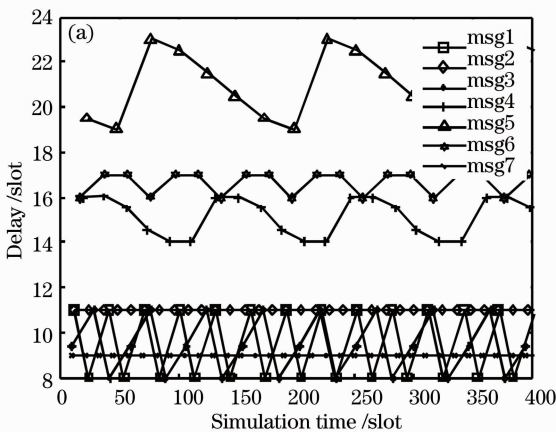


图 4 消息延迟。(a) $T_{RL} = 6$; (b) $T_{RL} = 10$

Fig. 4 Message delay. (a) Rotation cycle is 6; (b) rotation cycle is 10

图 4(a)和(b)分别是 7 条消息在不同轮询周期 ($T_{RL} = 6$ 和 $T_{RL} = 10$) 下的消息延迟时间曲线。由图 4(a)、(b)可知,尽管采用不同轮询周期,所有消息均在其对应的最大允许延迟时间内发送完成,满

足系统的实时性需求。同时,由两图的比较可得, $T_{RL} = 10$ 对应的消息延迟时间普遍小于 $T_{RL} = 6$ 时,这是因为前者使用了更多的波长信道资源,所以消息能够更及时地发出。

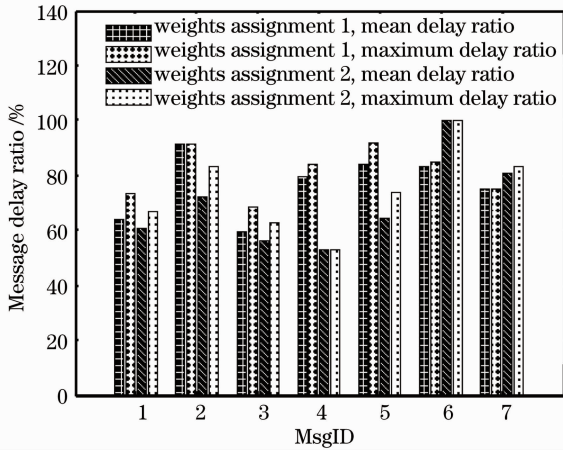


图5 不同轮询周期下的消息延迟时间率(平均和最大)
Fig. 5 Message delay ratio (maximum and mean) under different rotation cycles

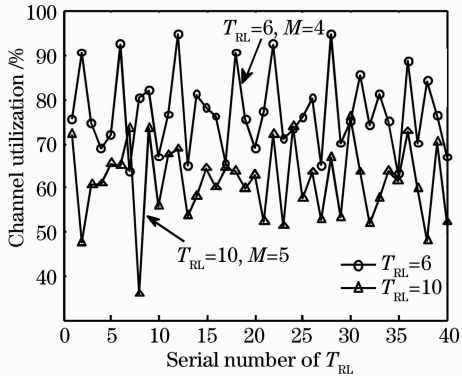


图6 不同轮询周期下的信道利用率
Fig. 6 Channel utilization under different rotation cycles

图5是每条消息对应的延迟时间率。这一指标在可用作衡量消息实时性的同时,也在一定程度上代表了消息传输对系统的容忍度:消息对应的最大延迟率越小,其容忍度越高,影响系统实时性能的外来因素(如抖动等)对实时性的影响就越小。由图5可知,无论 T_{RL} 取6或10,其最大延迟率均不超过1,满足系统的实时性需求,与图4结果相符。然而,比较不同轮询周期下的最大延迟时间率,可以看到 $T_{RL}=6$ 时最大消息延迟时间率普遍大于 $T_{RL}=10$ 时的最大消息延迟时间率。

图6显示出 $T_{RL}=6$ 时的信道利用率明显高于 $T_{RL}=10$ 时,其平均信道利用率分别为0.7714和0.6171,与图2和图3显示相符($T_{RL}=6$ 时,权值浪费最小)。因为对于同一消息集来说,在同样满足消息实时性的情况下,信道资源占用相对多,信道利用率也就相对低,然而好处是消息能及时发送,消息最大延迟时间率就越小,对影响实时性能的因素(如抖动等)的容忍度就越大。因此,可根据不同的工程要

求,进行不同轮转周期的选择。

4.2 权值分配方法对系统性能的影响

对前面提到的两种典型的权值分配方法的性能进行对比,在调度算法采取相同的轮转周期($T_{RL}=6$)及提出的多信道分配方法的情况下,采用权值分配方法1和权值分配方法2时对应的消息延迟及信道利用率的比较如图4(a)和图7~9所示。

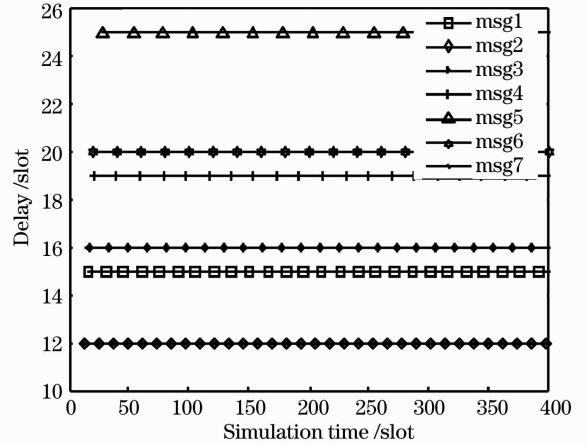


图7 权值分配方法2下的消息延迟
Fig. 7 Message delay with weights assignment scheme 2

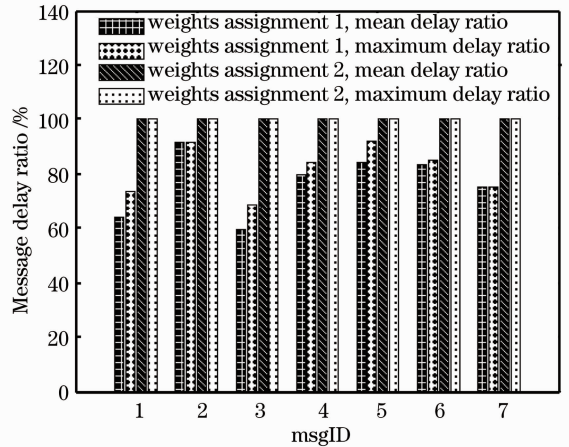


图8 不同权值分配下的消息延迟时间率(平均和最大)
Fig. 8 Message delay ratio (maximum and mean) under different weights assignment schemes

由于采用了不同的权值分配方式,消息在权值分配方法1中所分配权值大于权值分配方法2所分配的权值。因此,权值分配方法2下信道资源数目为3,而方法1对应的信道资源数目为4(见图3)。然而,对应权值分配2中的权值不足部分,需要补偿信道进行权值补偿。在本例中,1条信道即可完成补偿任务。在两种权值分配方法下,系统均需要4条信道完成消息实时传输。

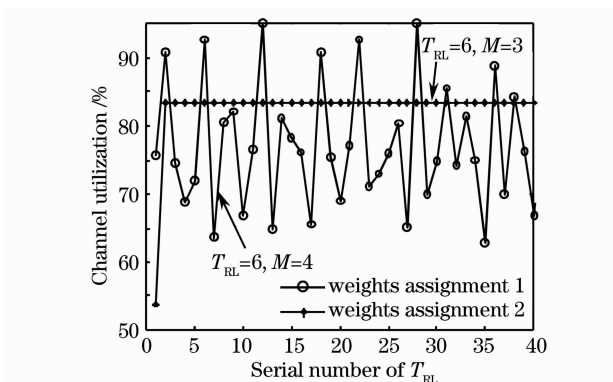


图 9 不同权值分配下的信道利用率
Fig. 9 Channel utilization under different weights assignment schemes

由图 4(a)和图 7 的比较可得,权值分配方法 1 的消息延迟时间小于权值分配方法 2 对应的消息延迟时间。同时,由图 8 可得,虽然所有消息其最大延迟率均不超过 1,满足系统的实时性需求,然而,权值分配方法 2 下的消息最大延迟时间率均为 1(此时的容忍度为最低),大于权值分配方法 1 下的消息最大延迟时间率。图 9 显示权值分配方法 2 下的信道利用率(不包含补偿信道)明显高于权值分配方法 1,其平均信道利用率分别为 0.8333 和 0.7714。而

采用权值分配方法 2,其补偿信道的信道利用率为 0.5857。

在考虑补偿信道情况下,由于两种分配方法下的实时调度算法的轮转周期和信道资源数目均相同,因此,两者的平均信道利用率在理论上是相同的。计算分配方法 2 对应的 4 条信道的平均利用率: $(0.8333 \times 3 + 0.5875) / 4 = 0.7714$,与理论一致。由以上分析得出,在仅考虑强实时信道的情况下,权值分配方法 2 对应的信道利用率明显高于权值分配方法 1 的。但是,若将补偿信道考虑在内,两者对应的信道资源及其占用情况一致,并且分配方法 1 的最大消息延迟率小于分配方法 2 的最大消息延迟率。

4.3 多信道分配方法对系统性能的影响

当 $T_{RL} = 6$ 时,使用权值分配方法 1 得到的各消息分配的权值分别为 2、3、3、4、2、5、4。采用最先合适算法的多信道分配方法和提出的多信道分配方法,得到两种方法下的信道和权值分配,分别如图 10(a),(b)所示。图中的 1(2)的意义为 1 代表消息序号,括号内的 2 代表在该信道上分配的权值大小。按照最先合适算法的分配原则,消息 7 被拆分了 2 次,而采用提出的多信道分配原则,无任何消息拆分,说明此方法可有效减少消息拆分次数,减小调度和系统设计的复杂度。

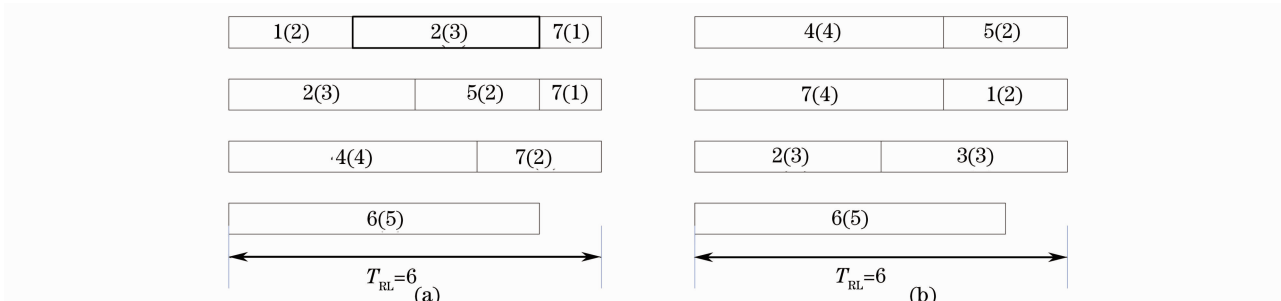


图 10 (a)最先合适算法和(b)多信道分配方法下的信道、权值分配

Fig. 10 Channels and weights allocation under (a) first fit and (b) multi-channel allocation method respectively

5 结 论

本文提出了保证机载波分复用网络实时性的加权轮转调度算法,解决机载波分复用网络中消息的实时发送问题,并对影响调度算法参数设计的三个重要过程做了详细分析讨论。结论如下:1)根据信道利用率最高时确定的轮转周期不能保证最优的最大消息延迟时间率;2)在平均信道利用率相同情况下,权值分配方法 1 下的最大消息延迟时间率优于权值分配方法 2 下的最大消息延迟时间率;3)针对多信道的应用环境,提出的多信道分配方法有效减少了消息拆分次数。

参 考 文 献

- 1 C. P. Collier. Next generation spacecraft interconnect standard (NGSIS) [C]. Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference, 2011. 63~64
- 2 D. J. Blumenthal. Terabit optical Ethernet for avionics [C]. Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference, 2011. 61~62
- 3 Zhao Zisen. Present and future of optical fiber communications [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900109
赵梓森. 光纤通信的过去、现在和未来 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900109
- 4 S. F. Habiby, M. J. Hackert. RONIA results: WDM-based optical networks in aircraft applications [C]. Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference, 2008. 71~72
- 5 Han Shuangli, Zhao Shanghong, Di Xiang. Integrated avionics in

- new fighter airplane and its high speed interconnection technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(3): 50~55
- 韩双利, 赵尚宏, 底翔. 新型战机综合航电系统及其高速光互连技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(3): 50~55
- 6 Lin Qiang, Xiong Huagang, Zhang Qishan. Packet scheduling for fibre channel switched fabric under hard real time constraints [J]. *Chinese J. Computers*, 2006, **29**(4): 570~575
- 林强, 熊华钢, 张其善. 光纤通道交换机在强实时约束下的分组调度[J]. *计算机学报*, 2006, **29**(4): 570~575
- 7 Xiong Huagang, Wang ZhongHua. Advanced Avionics Integration Techiques[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009
- 熊华刚, 王中华. 先进航空电子综合技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009
- 8 Kou Mingyan, Zhao Ran. Modern Aeronautical Communications Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011
- 寇明延, 赵然. 现代航空通信技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011
- 9 Song Liru, Zhou Li, He Feng *et al.*. A scheduling method for avionic WDM networks [J]. *Trans. Beijing Institute of Technology*, 2011, **31**(8): 978~983
- 宋丽茹, 周立, 何锋等. 一种航空电子 WDM 网络消息调度方法[J]. *北京理工大学学报*, 2011, **31**(8): 978~983
- 10 Zhou Li, Wang Haotian, He Feng *et al.*. A real time multichannel scheduling algorithm in avionics [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, **31**(10): 2034~2039
- 周立, 王昊天, 何锋等. 航空电子多信道实时分组调度方法[J]. *航空学报*, 2010, **31**(10): 2034~2039
- 11 Ding Fan, Song Liru, Xiong Huagang. A data transmission control algorithm for FC-AE-ASM network[J]. *J. Electronics & Information Technology*, 2009, **31**(6): 1509~1512
- 丁凡, 宋丽茹, 熊华钢. FC-AE-ASM 网络数据发送控制算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2009, **31**(6): 1509~1512
- 12 M. Ma, M. Hamdi. Providing deterministic quality-of-service guarantees on WDM optical networks [J]. *IEEE J. Selected Areas in Communications*, 2000, **18**(10): 2072~2083
- 13 J. W. S. Liu. Real Time Systems [M]. Eaglewood Cliffs: Prentice-Hall, 2000

栏目编辑: 王晓球