航空电子 WDM 网络多信道强实时调度设计

周 立 丁 凡 熊华钢

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对航空电子强实时网络,提出了一种广播选择型和波长路由型混合波分复用体系结构和其调度结构模型. 针对航电多信道强实时消息,提出了多信道负载比例轮转调度方法,以消息的负载比例在多信道上分配权值. 分析了子系统内部消息和子系统外部消息在体系结构中调度模式的不同,推导了经过单次调度的子系统内部消息和经多次调度的子系统外部消息的多信道强实时调度约束条件,从而满足了航电系统所有消息的端对端的实时传输. 针对航电实际系统,从系统资源和稳定性等角度提出了关键性参数的设计优化方法. 最后用一个航电消息集实例进行具体说明.

关 键 词: 航空电子; 波分复用; 实时系统; 调度算法

中图分类号: TP 393

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2010)12-1392-04

Hard real-time multichannel scheduling design in avionics WDM networks

Zhou Li Ding Fan Xiong Huagang

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: For avionics hard-time network, a composited wavelength division multiplexing (WDM) structure based on broadcasting network and wavelength routing network and scheduling structure model were proposed. For the hard real-time messages in the multichannel networks, a load ratio round-robin schedule method was proposed which allocating weight based on message load ratio in multichannel. Analysis of the differences between the interior messages and the exterior messages in the subsystem were given. Then the hard real-time schedulability conditions which the interior messages scheduled for one time and the interior messages scheduled for many times were derived to satisfy hard real-time communication of all of the messages in the avionics system. The key parameters were designed and optimized from the system resource usability and stability aspect for the real avionics system. Finally, a practice example was given.

Key words: avionics; wavelength division multiplexing; real time systems; scheduling algorithms

未来航空电子信息传输需要航空电子网络支持高速率,多服务通信. 需要支持控制消息、音频、视频、乃至模拟信号的通信服务. 尽管目前的航电网络已经发展到了交换式 GE or 10GE 以太网,满足了吞吐量的需求,然而它不能满足航电多业务并存传输、网络可扩展性和网络重构需求. WDM(Wavelength Division Multiplexing)光网络具有高带宽,多协议透明传输,网络结构灵活可升级等多种优点,非常适合下一代航空电子网络. 以波分复用为特征的先进光网络已经成为未来航空电子网络的技术选择目标. 文献[1]描述了航电 WDM 网络标准进展. 文献[2-3]分别提出了基于 ROBUS(Robust Bus)和 ShuffleNet 结构的航空电子 WDM 网络结构,然而都没有给出完整的航电网络体系结构设计. 未来航空电子网络的关键性能要求仍然是实时性,因此研究航电 WDM

收稿日期: 2009-11-03

基金项目: 航空基金资助项目(08C51009)

作者简介: 周 立(1980-),女,河南安阳人,博士生,birdinskyzl@ee.buaa.edu.cn.

网络体系结构下多信道实时调度方法十分必要.文献[4]提出可以将单信道调度转换成多信道调度的方法,并且不引发多余延迟.文献[5]提出了一种基于 GPS(Generalized Processor Sharing)模型的多信道公平调度方法,然而这些调度方法只研究了多信道调度的公平性和时延特性,并未涉及到强实时约束下多信道的可调度性研究.本文设计了一种航电 WDM 体系结构,在此基础上提出了一种多信道负载比例轮转调度策略,研究了该策略下子系统内外消息的端对端强实时调度方法和可调度条件,并根据航电实际需求给出了航电系统参数设计方法.

1　网络体系结构设计

WDM 网络分为广播选择网和波长路由网两种.广播选择网的特点是结构简单,信道配置灵活,然而普通的广播选择网中光可调谐器件的使用使网络稳定性变差.波长路由网的特点是光信道配置稳定,然而多跳传输的影响使得消息延迟相对高.图 1 为结合两种 WDM 网络优点建立的航空电子 WDM 网络体系结构,子系统网络采用广播选择型网络结构,它摒弃了可调谐元器件,采用稳定性强的光发射和接收阵列,使消息传输减少了调谐延迟.包括综合射频系统(RF),综合核心处理器(ICP),外挂管理系统(PL),综合光电系统(PE)和综合座舱系统(CC).子系统间采用波长路由型全光网络结构,通过点对点的独立波长信道进行全光传输,使子系统间消息单跳传输,低延迟.每个节点连接光发送光纤和光接收光纤,节点的光接收和发送阵列包括子系统内部波长和子系统外部波长的光发送机和接收机.图 2 是消息的调度结构图,子系统内消息(如综合核心处理器之间消息传输)调度在各个节点内部完成.节点按

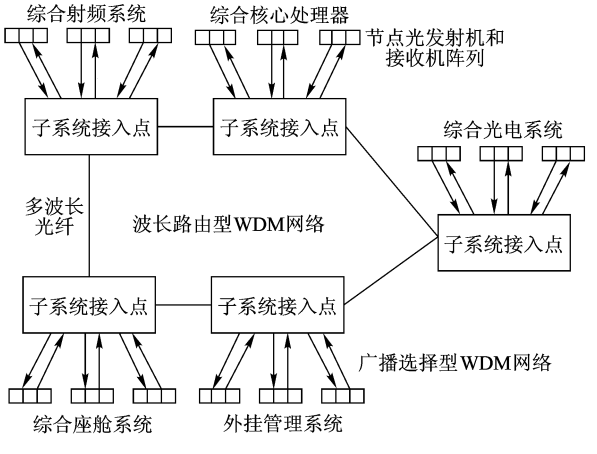

图 1　航空电子 WDM 网络体系结构

预分配方式在内部波长上按预设信道和时隙发送消息至光耦合器,广播到各个节点接收.节点发送子系统外消息(各子系统间消息互传)到外部波长上,子系统间调度器接收此类波长信道的消息然后进行光电转换后识别地址,调度传送到点对点的子系统间波长信道上,由接收子系统在外部波长上接收.

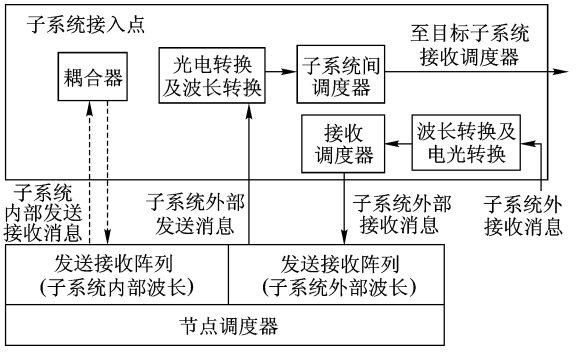

图 2　消息调度结构

2　多信道负载比例轮转调度

航空电子消息建模:设子系统消息集为 $S=\{S_1,S_2,\cdots,S_N\}$,消息表示为 $S_i=(C_i,P_i)$,C_i 为消息流发送时间,P_i 为消息流发送周期.消息流最大允许延迟 $D_i=P_i$.消息流负载率 $U_i=C_i/P_i$,总负载率为 U.其中子系统内部消息集 $S^{\text{in}}=\{S_1^{\text{in}},S_2^{\text{in}},\cdots,S_n^{\text{in}}\}$,总负载率为 U^{in}.子系统外消息集 $S^{\text{out}}=\{S_1^{\text{out}},S_2^{\text{out}},\cdots,S_n^{\text{out}}\}$,总负载率为 U^{out}.定义消息 i 在多信道轮转轮长 R_{L} 内所有信道 m 上发送时间之和为消息多信道轮转的权值 w_i.

多信道负载比例轮转调度方法:

1) 依据消息 i 在消息集 S 所占负载比例计算权值:$w_i=\dfrac{U_i}{U}\cdot R_{\text{L}}\cdot m$.

2) 查询各个信道的权值分配是否存在符合 w_i 需求的信道,将查询到的第一个信道分配给该消息,若所有信道均没有恰好满足需求的 w_i,则从第一个信道开始将把信道剩余的权值组合分配给强实时消息.

2.1　子系统内部消息强实时可调度性分析

图 3 为某节点的子系统内部消息调度模型,子系统内部消息为单跳消息.子系统内所有节点对消息集 S^{in} 启动相同的消息预分配调度算法在 $m^{\text{in-s}}$ 个子系统内部信道上进行负载比例轮转调度.消息只在发送节点内部调度一次.即消息的调度最大延迟取消息周期.(文中[·]为上取整).

定理 1　$m^{\text{in-s}}$ 满足方程组 $\left[\dfrac{U^{\text{in}}\cdot P_i^{\text{in}}}{R_{\text{L}}\cdot m^{\text{in-s}}}\right]\cdot R_{\text{L}}\leqslant P_i^{\text{in}}$,$\forall i,1\leqslant i\leqslant n$ 时,多信道负载比例调度策

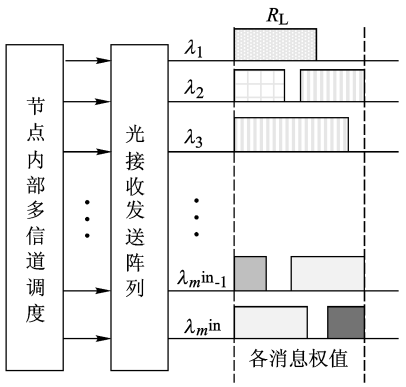

图3 子系统内部消息调度模型

略下 S^{in} 所有子系统内部消息满足强实时性.

证明 消息 i 按负载比例分配权值 $w_i=\frac{U_i}{U^{in}}\cdot R_L\cdot m^{in-s}$

多信道轮转调度下消息 i 的最大延迟为(忽略光传播延迟)

$$D_{i\max}=\left[\frac{C_i}{\frac{U_i}{U^{in}}\cdot R_L\cdot m^{in-s}}\right]\cdot R_L=\left[\frac{U^{in}\cdot P_i}{R_L\cdot m^{in-s}}\right]\cdot R_L$$

为满足消息的强实时性,对子系统内消息须:

$$\left[\frac{U^{in}\cdot P_i^{in}}{R_L\cdot m^{in-s}}\right]\cdot R_L\leqslant P_i^{in}\quad \forall i,1\leqslant i\leqslant n$$ **证毕**

2.2 子系统外部消息强实时可调度性分析

图4是某子系统外部消息信道轮转调度模型.消息经历了源子系统,子系统间光信道,目的子系统三次多信道调度,设调度延迟分别为:d_{in},d_{con},d_{out}.设光电转换、电光转换等固定延迟之和为 d_{oeo}.设消息 i 的源子系统 S_s^{sub},目的子系统为 S_d^{sub}.为使得延迟可控以及保证消息 i 的强实时性,令三层轮转调度权值相同:$w_i^{in}=w_i^{con}=w_i^{out}$.设子系统 S_s^{sub} 外部消息发送信道数为 m_T^{out-s},S_s^{sub} 到 S_d^{sub} 间骨干信道数为 m_T^{con-sd},S_s^{sub} 接收信道数为 m_R^{out-d}.

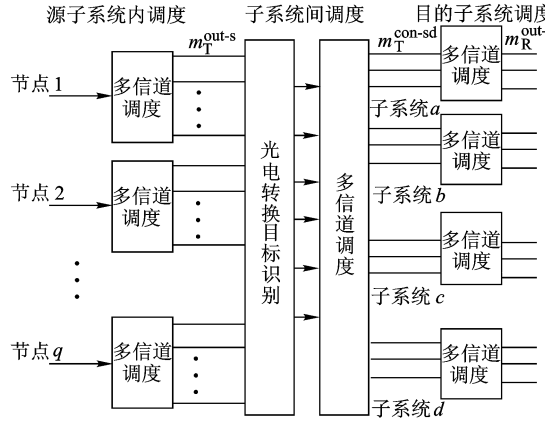

图4 子系统外部消息调度模型

S_s^{sub} 内目的地址同样为 S_d^{sub} 的消息集为:$S^{s-d}=\{S_1^{s-d},S_2^{s-d},\cdots,S_h^{s-d}\}$,总负载率为 U^{s-d}.S_d^{sub} 中接收消息集为所有源子系统[1,k]中目的地址为 S_d^{sub} 的消息集之和,$S^d=S^{1-d}\cup S^{2-d}\cdots\cup S^{k-d}$.

定理2 m_T^{out-s},m_T^{con-sd} 和 m_R^{out-d} 满足方程组 $\left[\frac{U^{out}\cdot P_i}{R_L\cdot m_T^{out-s}}\right]\cdot R_L\leqslant P_i-2\cdot R_L-d_{oeo}$,$m_T^{con-sd}\geqslant\frac{m_T^{out-s}\cdot U^{s-d}}{U^{out}}$;$m_R^{out-d}\geqslant\sum_{s=1}^{k}m_T^{con-sd}$,$\forall i,1\leqslant i\leqslant n$ 时,多信道负载比例调度策略下所有子系统外部消息 i 满足强实时性.

证明 消息 i 的源子系统调度输出数据流为 $S_i=(C_i^{out},R_L)$,C_i^{out} 为轮长 R_L 时间内的实际传输时间,$C_i^{out}\leqslant w_i^{in}$.又 $w_i^{in}=w_i^{con}=w_i^{out}$,则后两次调度为固定延迟:$d_{con}=d_{out}=R_L$.则消息 i 在源子系统内传输最大允许延时为:$D_{in}=P_i-2\cdot R_L-d_{oeo}$ 消息 i 满足源子系统内传输延迟条件为

$$\left[\frac{C_i}{\frac{U_i}{U^{out}}\cdot R_L\cdot m_T^{out-s}}\right]\cdot R_L=\left[\frac{U^{out}\cdot P_i}{R_L\cdot m_T^{out-s}}\right]\cdot R_L\leqslant P_i-2\cdot R_L-d_{oeo}$$

为保证子系统间和目的子系统的时延,消息 i 满足子系统间传输延迟条件为子系统间多信道调度可以满足 S^{s-d} 内所有消息权值分配,即

$$\sum_{i=1}^{h}w_i^{s-d}\leqslant m_T^{con-sd}\cdot R_L$$

$$\sum_{i=1}^{h}\frac{U_i}{U^{out}}\cdot R_L\cdot m_T^{out-s}\leqslant m_T^{con-sd}\cdot R_L$$

$$m_T^{con-sd}\geqslant\frac{m_T^{out-s}\cdot U^{s-d}}{U^{out}}$$

为满足目的子系统接收信道强实时约束,目的子系统多信道调度须满足 S^d 内所有消息权值分配,即目的子系统接收信道数须满足:$m_R^{out-d}\geqslant\sum_{s=1}^{k}m_T^{con-sd}$ **证毕**

3 航电多信道调度系统参数设计

航空电子多信道调度系统参数设计就是要在满足整个航电消息的强实时传输约束下设计合理的系统参数.系统参数主要是轮转长度 R_L 和各个系统信道数目 M.其中轮长 R_L 越大,则调度器在各消息间切换次数越少,系统资源浪费越少,稳定性越高;体系结构中总信道数目越小,系统占用资源越少.令评价函数 $F(R_L,M_1,M_2,\cdots,M_n)=1/R_L+\sum_{i=1}^{n}M_i$.航电系统设计问题转换为非线性最优化问题,即

$$\text{s.t.}\begin{cases}\left\lceil\dfrac{U^{\text{in}}\cdot P_i^{\text{in}}}{R_{\text{L}}\cdot m^{\text{in-s}}}\right\rceil\cdot R_{\text{L}}\leqslant P_i^{\text{in}} & S_i\in S^{\text{in}}\\ \left\lceil\dfrac{U^{\text{out}}\cdot P_i}{R_{\text{L}}\cdot m_{\text{T}}^{\text{out-s}}}\right\rceil\cdot R_{\text{L}}\leqslant P_i-2R_{\text{L}}-d_{\text{oeo}} & S_i\in S^{\text{out}}\\ m_{\text{T}}^{\text{con-sd}}\geqslant\dfrac{m_{\text{T}}^{\text{out-s}}\cdot U^{\text{s-d}}}{U^{\text{out}}}\\ m_{\text{R}}^{\text{out-d}}\geqslant\sum_{s=1}^{k}m_{\text{T}}^{\text{con-sd}}\end{cases}$$

$$\min F(m^{\text{in-s}},m_{\text{T}}^{\text{out-s}},m_{\text{T}}^{\text{con-sd}},m_{\text{R}}^{\text{out-d}})$$

4　实例分析

讨论一个具体的航空电子消息集,具体参数见表 1.

表 1　航空电子消息参数

消息	源	目的	属性	长度/bit	周期/ms
S_1	RF	ICP	系统外	1 000	0.19
S_2	RF	ICP	系统外	2 000	0.38
S_3	RF	ICP	系统外	2 000	0.44
S_4	PE	ICP	系统外	500	0.12
S_5	PE	ICP	系统外	200	0.12
S_6	ICP	CC	系统外	500	0.19
S_7	PL	ICP	系统外	500	0.12
S_8	ICP	ICP	系统内	1 200	0.38

设单信道发送速率为 10 Mbit/s,每个 slot 为 0.01 ms. 固定延迟部分设为 1 个 slot. 将 S_1-S_8 转换为以 slot 为单位的消息集.

$S_{\text{slot}}=\{(10,19),(20,38),(20,44),(5,12),(2,12),(5,19),(5,12),(12,38)\}$

在多信道负载比例调度策略下,根据定理 1、定理 2 可得出非线性最优化问题中各系统信道强实时约束条件和最优化目标函数:

$$\begin{cases}\left\lceil\dfrac{28.64\times19}{R_{\text{L}}\cdot m_{\text{T}}^{\text{out-RF}}}\right\rceil\cdot R_{\text{L}}\leqslant19-2R_{\text{L}}-1\\ \left\lceil\dfrac{28.64\times38}{R_{\text{L}}\cdot m_{\text{T}}^{\text{out-RF}}}\right\rceil\cdot R_{\text{L}}\leqslant38-2R_{\text{L}}-1\\ \left\lceil\dfrac{28.64\times44}{R_{\text{L}}\cdot m_{\text{T}}^{\text{out-RF}}}\right\rceil\cdot R_{\text{L}}\leqslant44-2R_{\text{L}}-1\\ \left\lceil\dfrac{7}{R_{\text{L}}\cdot m_{\text{T}}^{\text{out-PE}}}\right\rceil\cdot R_{\text{L}}\leqslant12-2R_{\text{L}}-1\\ \left\lceil\dfrac{5}{R_{\text{L}}\cdot m_{\text{T}}^{\text{out-ICP}}}\right\rceil\cdot R_{\text{L}}\leqslant19-2R_{\text{L}}-1\\ \left\lceil\dfrac{5}{R_{\text{L}}\cdot m_{\text{T}}^{\text{out-PL}}}\right\rceil\cdot R_{\text{L}}\leqslant12-2R_{\text{L}}-1\\ \left\lceil\dfrac{12}{R_{\text{L}}\cdot m^{\text{in-ICP}}}\right\rceil\cdot R_{\text{L}}\leqslant38\end{cases}$$

目标函数为

$$F_{\min}=m_{\text{T}}^{\text{out-RF}}+m_{\text{T}}^{\text{out-PE}}+m_{\text{T}}^{\text{out-ICP}}+m_{\text{T}}^{\text{out-PL}}+m^{\text{in-ICP}}+1/R_{\text{L}}$$

通过非线性最优化问题的启发式算法,求得优化参数:

$$m_{\text{T}}^{\text{out-RF}}=2m_{\text{T}}^{\text{out-PE}}=m_{\text{T}}^{\text{out-ICP}}=m_{\text{T}}^{\text{out-PL}}=m^{\text{in-ICP}}=1$$

$$R_{\text{L}}=1\text{ slot}$$

又根据:$m_{\text{T}}^{\text{con-RFICP}}\geqslant m_{\text{T}}^{\text{out-RF}}$;$m_{\text{T}}^{\text{con-PEICP}}\geqslant m_{\text{T}}^{\text{out-PE}}$;$m_{\text{T}}^{\text{con-PLICP}}\geqslant m_{\text{T}}^{\text{out-PL}}$;$m_{\text{T}}^{\text{con-ICPCC}}\geqslant m_{\text{T}}^{\text{out-ICP}}$;$m_{\text{R}}^{\text{out-CC}}\geqslant m_{\text{T}}^{\text{con-ICPCC}}$;$m_{\text{R}}^{\text{out-ICP}}\geqslant m_{\text{T}}^{\text{con-RFICP}}+m_{\text{T}}^{\text{con-PEICP}}+m_{\text{T}}^{\text{con-PLICP}}$.

可得体系结构中所有子系统发送接收信道数目见表 2.

表 2　各子系统发送接收信道数目结果

子系统	消息	m^{in}	m_{R}^{in}	$m_{\text{T}}^{\text{out}}$	$m_{\text{R}}^{\text{out}}$	$m_{\text{T}}^{\text{con}}$	$m_{\text{R}}^{\text{con}}$
RF	S_1 S_2 S_3	无	无	2	无	2	无
PE	S_4 S_5	无	无	1	无	1	无
PL	S_7	无	无	1	无	1	无
CC	S_6	无	无	无	1	无	1
ICP	$S_1\sim S_8$	1	1	1	4	1	4

5　结束语

WDM 网络作为下一代航空电子网络的候选网络,研究其体系结构和网络性能十分必要. 本文设计了一种航空电子 WDM 网络体系结构. 针对其多信道消息调度的不同模式,讨论了子系统内部消息和子系统外部消息的调度模式,研究了实时性可调度条件,给出了判定定理. 最后讨论了航电 WDM 网络设计优化的方向,给出了节约系统资源下的系统参数设计方法. 本文的设计方法和研究结论将有助于未来航空电子 WDM 网络的设计和性能分析.

参考文献(References)

[1] Habiby S F. Advances in WDM LAN standards development for aerospace applications[C]// Avionics Fiber-Optics and Photonics, IEEE Conference. Annapolis, MD: IEEE, 2006: 20-21

[2] Gardner R D, Andonvic I, Hunter D K, et al. PHONAV-a photonic WDM network architecture for next generation avionics systems[C]// IEEE Aerospace Conference. Snowmass at Aspen, CO, USA: [s. n.], 1999: 451-466

[3] Jessop C N, Jenkins R B, Voigt R J. Routing in an optical local area network using wavelength conversion[C]//Avionics Fiber-Optics and Photonics, IEEE Conference . Annapolis, MD: [s. n.], 2006: 24-25

[4] Cobb J A, Lin M. A theory of multi-channel schedulers for quality of service[J]. J High Speed Netw, 2003: 12(1/2): 61-86

[5] Blanquer J M, Ozden B. Fair Queuing for aggregated multiple links [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference. San Diego, CA: [s. n.], 2001: 189-197

(编　辑:娄　嘉)