航空电子 WDM 网络的实时性能分析

周 立 赵 然 于 航

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191) (某部装备发展办公室, 北京 100073)

熊华钢

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对航空电子波分复用 (WDM, Wavelength Division Multiplexing)网络实时性评估问题,采用网络演算理论,提出了一种周期消息在 WDM 复杂虚拓扑上多跳端对端最大延迟的计算方法. 建立了波长路由器 WDM 网络模型,分析了消息流端对端延迟的组成部分. 针对网络演算理论下的 WDM 网络通信模型,推导了消息经单节点和多节点波长路由器的最大延迟的计算公式. 并结合实际航空电子系统对公式进行了修正,解决了突发度过大的问题. 最终得到最大延迟的紧密上限. 最后在 OPNET仿真环境下验证了计算分析方法的有效性.

关 键 词: 波分复用; 航空电子; 网络性能; 实时系统

中图分类号: TP 393

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)11-1408-05

Real-time performance evaluation in WDM networks for avionics

Zhou Li

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

Zhao Ran Yu Hang

(A Department of Equipment and Development, Beijing 100073, China)

Xiong Huagang

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

Abstract: To solve real-time performance evaluation problem in avionics wavelength division multiplexing (WDM) network, a method of end-to-end maximum delay calculation during multihop period message transmitting in WDM virtual topology was provided, based on network calculus analysis theory. A network model of the wavelength routing WDM networks was built, and then the composed parts of the end-to-end delay were analyzed. Concerning the communication model of the wavelength routing WDM networks based network calculus analysis theory, a concisely analytical expression was derived for message maximum delay passing through single and multiple wavelength routers. And then treatments of the expression which resolving the problem of the overextended burst were modified to obtain the closed upper bound of maximum delay according to the actual system of avionics. Finally, the evaluated method was testified by the simulation results on OPNET.

Key words: wavelength division multiplexing; avionics; network performance; real time systems

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. 国外许多文献[1-6]已经针对航空电子 WDM 网络的结构、标准进行了深入研究. 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

收稿日期: 2009-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60879024)

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

选择目标.其中的波长路由 WDM网络由于技术成熟,低延迟,虚拓扑结构灵活更值得关注.

实时性是航空电子网络的主要性能要求之一.因此分析 WDM网络的时延性能十分重要.网络演算的方法相比基于排队论的概率分析方法更能准确地评价网络的确切时延.文献[7]用此方法分析了交换式工业以太网中的网络延迟.文献[8]分析了 AFDX(Avionics Full Duplex Switched Ethernet航空电子全双工以太网)FIFO(First Input First Output先进先出)服务器下端对端延迟的上限.然而已有文献却对多跳网络中得到紧密上限的延迟讨论很少,只有文献[9]提到在线型拓扑以太网中重整流的方法,但仍然没有涉及更复杂网络结构.航空电子环境下的波分多路网络有其特殊性:虚拓扑结构不规则,周期性消息流在虚拓扑上跳数多,路由复杂.本文的目标是基于网络演算的基本理论,对波长路由的多跳 WDM网络的实时性能进行建模和分析.

1　航电波长路由 WDM网络模型

图 1是一个航空电子 WDM波长路由网络实例.它采用重叠型的 WDM网络模型,具有层次分明,继承性好的特点.它支持多种拓扑结构和多种航电协议的互连,如:FC(Fiber Channel),Ethernet协议等.

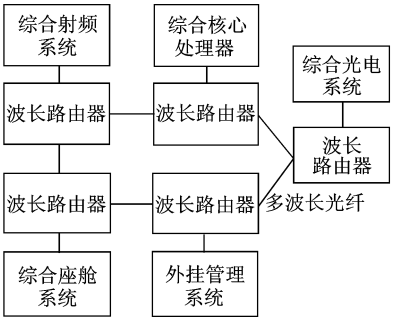

图 1　波长路由 WDM网络结构

其中最主要的网络设备是波长路由器,它集成了电层和光层路由器的功能,底层是 OXC(Optical Cross-connect光交叉连接),构成不同的光路集合嵌入物理拓扑,从而形成可重构虚拓扑;上层电层负责将消息流在虚拓扑的光路上路由.

图 2是波长路由器结构模型.它对不同光路上的消息流的处理分为 3种,λ_0 光路进入本地接收;有直通光路的消息流 λ_P直通,不经过光电及电光转换;没有直通光路的消息流则需经过光电转换后进入路由子系统路由并发送到相应的输出链路发射机队列排队,本文发射机排队均采用 FCFS(First Come First Served)的调度方式.

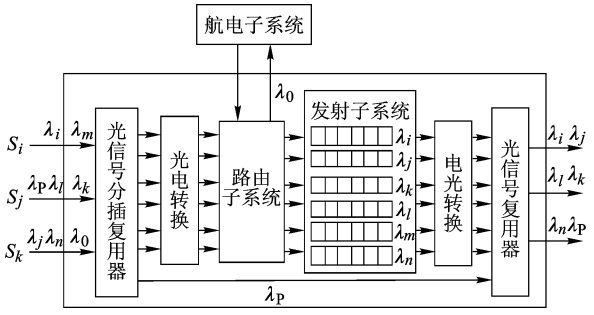

图 2　波长路由器模型

消息流端对端延迟可以表示为

$$d_{\text{end-to-end}} = d_{\text{prop}} + d_{\text{trans}} = d_{\text{prop}} + \sum_{h=1}^{H} (d_{\text{eo}}^{h} + d_{\text{queue}}^{h} + d_{\text{oe}}^{h}) \quad (1)$$

其中,d_{prop}为传播延迟;d_{trans}为转发延迟;d_{eo}^{h}为第 h跳波长路由器的电光转换延迟;d_{queue}^{h}为第 h跳波长路由器的发射机排队延迟;d_{oe}^{h}为第 h跳波长路由器的光电转换延迟.d_{trans}是主要部分,取决于消息在虚拓扑上的跳数 H和每跳的消息流量.下面将基于网络演算理论分析计算航空电子周期性消息的端对端延迟.

2　端对端时延分析

2.1　多跳 WDM网络的消息通信模型

Cruz提出的网络演算理论[10]将网络抽象成几种简单的网络元素,包括延迟线、接收缓存、多路分配器、多路复用器、调节器等,可以用来估算网络的最大延迟,从而评价网络的实时性能.图 3是消息在多跳 WDM网络上的网络演算模型,其中的链路传输延迟、包的路由延迟、固定的光电和电光转换延迟被抽象为恒定延迟线.波长通道发射机排队被抽象成 FIFO的多路复用器.

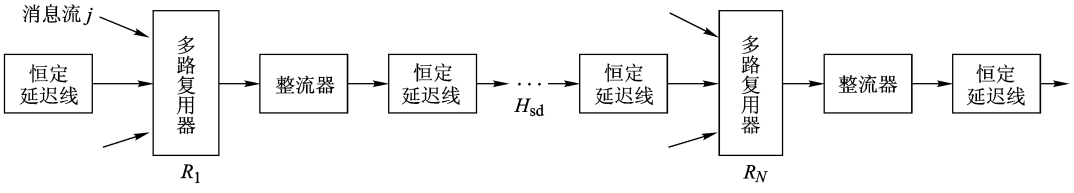

图 3　多跳 WDM网络的消息通信模型

2.2 周期消息经单个波长路由器最大延迟分析

设航电周期消息集 $M=\{\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n\}$,每个消息流的进入曲线为

$$\alpha_i(t)=\rho_i t+\sigma_i=\frac{D_i}{P_i}t+D_i \quad i=1,\cdots,n \tag{2}$$

其中,ρ_i 是消息流长期平均速率的最大值;σ_i 是消息流一次爆发的最大消息量;D_i 是数据帧的最大长度;P_i 是消息周期.

将波长路由器抽象成一个多路复用器,采用FCFS的服务.设复用器的服务能力为 C,M 中有 k 个消息流经过此波长路由器需要服务,$\sum_{j=1}^{k}\rho_i<C$,服务曲线为 $C[t-0]^+$.

由网络演算理论的漏桶模型的性能分析知,消息流通过一个波长路由器的最大时延 $d_{\max}$ 是由进入曲线和服务曲线的最大距离决定的[11].复用器提供给消息流 i 的服务曲线[12]为

$$\beta(t)=\left[C-\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i-\rho_i\right)\right]\left[t-\frac{\sum_{i=1}^{k}\sigma_i-\sigma_i}{C}\right] \tag{3}$$

服务时延参数为 $T^i=\dfrac{\sum_{i=1}^{k}\sigma_i-\sigma_i}{C}$,服务速率参数为 $C^i=C-\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i-\rho_i\right)$.由图4可得:

$$d_{\max}=T^i+\frac{\sigma_i}{C^i}=\frac{\sum_{i=1}^{k}\sigma_i-\sigma_i}{C}+\frac{\sigma_i}{C-\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i-\rho_i\right)} \tag{4}$$

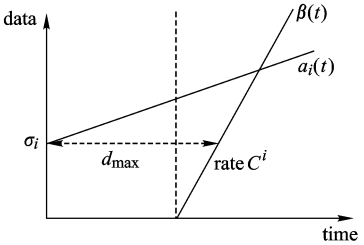

图4 漏桶模型网络演算性能分析

2.3 周期消息经多个波长路由器最大延迟分析

消息流经过下一级波长路由器的输入即为上级波长路由器的输出,消息的突发度和消息的特性将发生显著变化使得时延难以估计,下面详细阐述这一事实.

消息在第一级波长路由器上的离开曲线为 $\alpha^*(t)=\alpha(t+T_i)=\rho_i t+\sigma_i+\rho_i T_i$,突发度 $\sigma_i+\rho_i T_i$.原始周期消息经过一个FCFS多路复用器后变成非周期消息流,突发度增加了 $\rho_i T_i$.消息的突发度衡量了在一个时间单位内消息的同时发生的长度,直接影响了消息最大延迟.突发度随消息流在虚拓扑上的路由跳数不断的增加而增大,这会使消息的最大延迟难以计算,无法判断消息的实时性.因此,为了避免此现象,消息每跳结束后,增加一个整流器对消息流进行整流[9].设整流器模型为:$Ct+B$,其中 $B=\max(\sigma_i)$,为消息集 M 中消息突发度最大值.经过整流后消息离开曲线为:$\alpha^{**}(t)=\rho_i t+B$,消息突发度为 B.这样可以较容易得到消息流 j 的多跳端对端延迟.

设此消息在虚拓扑上的路径是 $R_1,R_2,\cdots,R_N$,共 N 跳.由于WDM网络的多路传输特性,各跳的服务速率可以不同,此速率为在各个波长路由器上占用的多波长传输服务速率,设各跳的服务速率是 $C_1,C_2,\cdots,C_N$.消息流 j 在 R_i 跳的并发消息流为 $S_{i1},S_{i2},\cdots,S_{ij},\cdots,S_{M_i}$,共 M_i 个流,恒定延迟为 T,设有 k_i 个消息流已经过了流量整形.消息流 j 的进入曲线为 $S_{1j}(t)=\rho_{1j}t+\sigma_{1j}$.

消息流 j 在 R_1 上的最大延迟为

$$D_{R_1}=\frac{\sum_{j=1}^{M_1-k_1}\sigma_{1j}+k_1B}{C_1}+\frac{\sigma_{1j}}{C_1-\sum_{j=1}^{M_1-1}\rho_{1j}}+T \tag{5}$$

$$D_{\text{end-to-end}}=\sum_{i=1}^{N}D_{Ri}=(2N-1)T+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\sum_{j=1}^{M_i-k_i}\sigma_{ij}+k_iB}{C_i}+\frac{\sigma_{ij}}{C_i-\sum_{j=1}^{M_i-1}\rho_{ij}}\right) \tag{6}$$

需要指出的是,若在 R_i 跳中有消息流被波长路由器分流,则需要在下游路径中除去这些消息流.

2.4 航电环境下消息端对端最大延迟分析

航空电子环境下,通信负载一般在设计时给定,在WDM网络的虚拓扑确定情况下,消息采用静态路由的方式.由式(6)知,$D_{\text{end-to-end}}$ 的结果取决于因子 $\sum_{j=1}^{M_i-k_i}\sigma_{ij}+k_iB$.该因子衡量的是先于消息流 j 服务的聚合流,一般是考虑所有共享波长通道的消息流.经分析验证,这样得出的端对端的最大延迟上限太大,造成结果与实际结果差距较大.原因是在航空电子实际网络中,波长通道的发射速率(多路复用器的服务速率)应远远大于消息的产

生速率,所有共享波长信道的消息流同时到达并要求服务的情况几乎不存在.因此,为了使计算更切合实际网络,最大延迟的计算只考虑共享波长信道的无相位差的周期消息聚合流.假设所有消息的起始时间相同,则修正后的计算公式为

$$D_{\text{end-to-end}} = \sum_{i=1}^{N} D_{Ri} = (2N - 1)T + \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\sum_{j=1}^{M_i - k_i}\sigma_{ij}}{C_i} + \frac{\sigma_{ij}}{C_i - \sum_{j=1}^{M_i - 1}\rho_{ij}}\right) \quad (7)$$

由此,式(7)可得航电环境下每个消息的最大延迟,可以比较消息的最大延迟和消息的最大允许时间,衡量是否可以满足其实时性要求;并且由于WDM网络可以用增加波长通道的方法很容易实现增加带宽的目的,所以在多跳 WDM网络的消息传输路径上,可以用增加波长通道的方法提高服务速率 C_i,达到缩小延迟,提高实时性的目的.

3　仿真验证及结果分析

仿真在 OPNET10.0环境下进行,WDM网络由 5个波长路由器构成.网络物理拓扑如图 1,虚拓扑光路配置如图 5.仿真设置如下:光纤为单纤双向系统.每个光纤支持三个波长通道,每个波长路由器配有两个发射机和两个接收机端口.每个波长路由器向其余发相同的周期消息,消息长度固定为 1 000 bit,消息周期为 50μs每个波长通道的服务速率为 1 Gbit/s,采用 FCFS的排队方式.仿真和计算中均设固定延迟为 0.

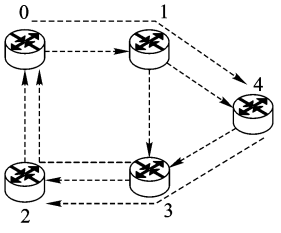

图 5　仿真物理拓扑和虚拓扑光路

虚拓扑上的光路共 9条 $L_{01}, L_{14}, L_{13}, L_{43}, L_{32}, L_{20}, L_{014}, L_{320}, L_{432}$.消息在虚拓扑上的路由采用最短路径的方法.每个消息进入曲线为:$\alpha_i(t) = 2 \times 10^7 t + 1\,000$.反复用公式(7)得到 20个消息流的最大延迟如表 1.在相同配置下,运行仿真 8次,可得仿真结果如图 6.

由仿真结果可知,用式(7)计算出的延迟曲线趋势和仿真出的数据趋势相同,并且由于网络演算考虑的网络中最差情况,仿真得出的延迟永远小于计算出的最大延迟,平均差距为 21.15%,因此说明此计算方法可以有效地用来估算消息在WDM网络上的多跳端对端延迟,从而分析消息的实时性能.

表 1　用计算方法得到的最大延迟数据

消息	虚拓扑路由	计算最大延迟/μs
S_{01}	L_{01}	3.041 6
S_{02}	$L_{01}\rightarrow L_{13}\rightarrow L_{32}$	8.107 4
S_{03}	$L_{01}\rightarrow L_{13}$	6.083 3
S_{04}	L_{014}	1.000 0
S_{10}	$L_{13}\rightarrow L_{320}$	5.062 1
S_{12}	$L_{13}\rightarrow L_{32}$	5.062 1
S_{13}	L_{13}	3.041 7
S_{14}	L_{14}	1.000 0
S_{20}	L_{20}	4.063 8
S_{21}	$L_{20}\rightarrow L_{01}$	7.105 5
S_{23}	$L_{20}\rightarrow L_{01}\rightarrow L_{13}$	10.147
S_{24}	$L_{20}\rightarrow L_{014}$	5.063 8
S_{30}	L_{320}	2.020 4
S_{31}	$L_{320}\rightarrow L_{01}$	5.062 1
S_{32}	L_{32}	2.020 4
S_{34}	$L_{32}\rightarrow L_{20}\rightarrow L_{01}\rightarrow L_{14}$	10.126
S_{40}	$L_{432}\rightarrow L_{20}$	6.084 2
S_{41}	$L_{43}\rightarrow L_{32}\rightarrow L_{20}\rightarrow L_{01}$	11.146
S_{42}	L_{432}	2.020 4
S_{43}	L_{43}	2.020 4

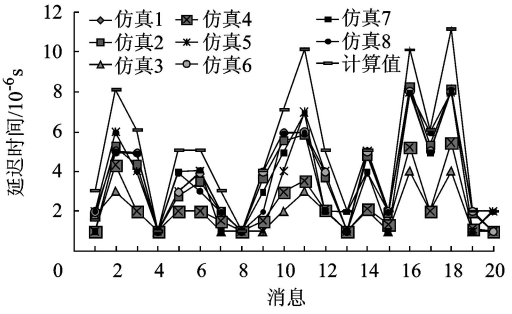

图 6　仿真的最大延迟与计算数据对比

4　结 束 语

WDM网络作为下一代航空电子网络的候选网络,实时性能的分析十分必要.本文对波长路由WDM网络进行建模,并在网络演算理论下,分析和推导了航电周期消息在复杂虚拓扑情况下的端对端最大延迟,最后给出了切实可行的消息经过多个波长路由器的最大延迟的计算方法,有较强的通用性,可以用来评价未来航电 WDM网络端对端消息的实时性能,为设计和优化实时航空电子 WDM网络的虚拓扑奠定了理论基础.

参考文献 (References)

[1] Gardner R D, Andonovic I, Hunter D K, et al. PHONAV-a photonic WDM network architecture for next generation avionics

systems[C]// IEEE Aerospace Conference. Snowmass: Institude of Electic and Electronic Engineer, 1999, 2: 451 - 466

[2] Salour M M, Bellamy J C. A WDM optical network for avionics [C]//Avionics Fiber-Optics and Photonics, IEEE Conference. USA: [s n.], 2005: 13 - 14

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

[4] Reardon C, Profumo J, George A D. Comparative simulative analysis of WDM LANS for avionics platforms [C]//Military Communications Conference. Washington: [s n.], 2006: 1 - 7

[5] Harres D N. Current state and future direction for military aircraft fiber optics networks[C]//Digital Avionics Systems Conference. Indianapolis: DASC, 2003: 6. B. 2 - 6. 1 - 8

[6] 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. 2006: 24 - 25

[7] Mifdaoui A, Frances F, Fraboul C. Full duplex switched ethernet for next generation "1553B"-based applications[C]//Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium. 2007: 45 - 56

[8] Boyer M, Fraboul C. Tightening end to end delay upper bound for AFDX network calculus with rate latency FIFO servers using network calculus[C]//Factory Communication Systems. 2008: 11 - 20

[9] Fan Cen, Tao Xing. Real-time performance evaluation of line topology switched ethernet[J]. International Journal of Automation and Computing, 2008, 5(4): 376 - 380

[10] Cruz R L. A calculus for network delay, part i: Network elements in isolation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1): 114 131

[11] Le Boudec, Thiran P. A short tutorial on network calculus I: fundamental bounds in communication networks[C]//Circuits and Systems, the 2000 IEEE International Symposium. 2000: 93 - 96

[12] 胡晓娅,朱德森,汪秉文. 基于网络演算的交换式以太网实时特性分析[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(1): 22 - 24
Hu Xiaoya, Zhu Desen, Wang Bingwen. Real-time performance evaluation in switched ethernet by network calculus[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(1): 21 - 24 (in Chinese)

(编 辑:娄 嘉)

(上接第 1374页)

5 结 论

综上所述,本文提出的子带变换和 OFDM 自适应调制相结合的图像分级编码传输方法实现了多径衰落信道下图像的信源信道联合编码调制传输,结构简单,编解码复杂度和延迟小;仿真表明基于其数学模型分析得到的信源信道联合优化带宽功率分配算法可有效提高带宽功率利用率.

参考文献 (References)

[1] Alouini M S, Goldsmith A J. Capacity of fading channels with channel side information[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1997, 43: 1986 - 1992

[2] Zheng Haitao, Liu K J Ray. The subband modulation: a joint power and rate allocation framework for subband image and video transmission[J]. IEEE Trans on Circuits and System for Video Technology, 1999, 9(5): 823 - 838

[3] Ruf M J, Modestino J W. Operational rate-distortion performance for joint source and channel coding of images[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(3): 305 - 320

[4] Cai Jianfei, Chen Changwen. Robust joint source-channel coding for image transmission over wireless channels[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2000, 10(6): 962 - 966

[5] 王哲,张晓林,陈雷. 一种鲁棒的图像小波变换模拟编码传输方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(6): 703 - 706
Wang Zhe, Zhang Xiaolin, Chen Lei. A robust image communication system based on wavelet transform analog coding [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 24(6): 703 - 706 (in Chinese)

[6] Tor A Ramstad, The marriage of subband coding and ofdm transmission [C]// Proc 6th Baiona Workshop on Signal Processing in Communications. Baiona, Spain: IEEE CS, 2003

[7] Nariman Farvarin. A study of vector quantization for noisy channels[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1990, 36(4): 799 - 809

[8] Linde Y, Buzo A, Gray R M. An algorithm for vector quantizer design[J]. IEEE Trans on Communication, 1980, 28: 84 - 95

[9] 刘凯明. OFDM系统中的自适应调制技术研究[D]. 北京:北京邮电大学电信工程学院, 2006
Liu Kaiming. Adaptive modulation techniques in OFDM systems [D]. Beijing: School of Telecomunications, Beijing University of Posts and Telecommunivation, 2006 (in Chinese)

[10] 王哲,张晓林. 多误码率固定速率 OFDM 自适应调制比特功率分配方法[J]. 信号处理, 2009, 25(8): 1261 - 1265
Wang Zhe, Zhang Xiaolin. Bit and power allocation of multiple bit error rate OFDM adaptive modulation [J]. Signal Processing, 2009, 25(8): 1261 - 1265 (in Chinese)

[11] Westerink P H, Biemond J, Boekee D E. An optimal bit allocation algorithm for subband coding [C]//Proc International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. New York, USA: IEEE CS, 1988

[12] Recommendation ITU-R M. 1225, Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000, annex 2[S]

[13] Cioffi J M. A multicarrier primer[R]. ANSI TIE 1. 4, 1991

(编 辑:娄 嘉)