

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.04.024

引用格式:张景辉,叶通, Lee T T,等.带偏射补偿机制的 Birkhoff-von-Neumann 交换机方案及其性能分析[J].电讯技术,2014,54(4):500-505. [ZHANG Jing-hui, YE Tong, Lee T T, et al. Design and Performance Analysis of Deflection-compensated Birkhoff-von-Neumann Switches[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(4):500-505.]

# 带偏射补偿机制的 Birkhoff-von-Neumann 交换机方案及其性能分析\*

张景辉\*\*, 叶通, Lee T T, 闫芳芳, 胡卫生

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** Birkhoff-von-Neumann (BvN) 交换机具有较低的执行复杂度和较高的吞吐量, 但无法在业务突发的环境下提供性能保证。为此, 提出一种带偏射的 BvN (D-BvN) 交换机制来增强交换机性能。D-BvN 交换机通过平均业务矩阵的 BvN 分解, 为每个虚电路 (VC) 提供均值带宽保证, 同时通过偏射来处理业务突发。其主要思想是利用处于空闲状态的 VC 的闲置容量处理处于溢出状态的 VC 的溢出业务。具体地, 偏射机制利用空闲 VC 的闲置容量完成两件事情: 一是把溢出业务偏射到其他 VC, 二是给偏射业务提供到达目的端口的带宽。分析和仿真结果表明, 所提方法不仅可以获得接近 100% 的输入负载吞吐量, 而且具有较低的包乱序概率和较小的业务包延时。

**关键词:** 输入排队交换机; Birkhoff-von-Neumann 交换机; 偏射补偿; 突发业务

**中图分类号:** TN915 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2014)04-0500-06

## Design and Performance Analysis of Deflection-compensated Birkhoff-von-Neumann Switches

ZHANG Jing-hui, YE Tong, Lee T T, YAN Fang-fang, HU Wei-sheng

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Although the quasi-static scheduling based on Birkhoff-von-Neumann (BvN) decomposition can achieve high throughput with low operational complexity, its performance becomes less predictable when the input traffic is bursty. In this paper, a deflection-compensated BvN (D-BvN) switch is proposed to enhance the performance. The D-BvN switch provides capacity guarantee for each virtual circuit (VC) by the BvN decomposition of average input traffic matrix, while coping with traffic burst by deflection. In particular, deflection scheme fully utilizes the spare capacity of starving VCs to deflect overflow traffic to other VCs and provide bandwidth for deflection traffic to re-access its desired VC. Analytical and simulation results show that it can achieve 100% throughput of offered load, negligible packet out-of-sequence probability and lower packet delay.

**Key words:** input-queued switch; Birkhoff-von-Neumann switch; scheduling; deflection-compensated; bursty traffic

### 1 引言

调度器对于输入排队交换机来说是一个核心问

题。一个好的调度器能够最大化吞吐量, 减少端到端延时以及减少计算复杂度。过去十几年里, 业界

\* 收稿日期: 2014-01-03; 修回日期: 2014-02-21 Received date: 2014-01-03; Revised date: 2014-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61271215, 60825103)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61271215, 60825103)

\*\* 通讯作者: zjhrzbb@sjtu.edu.cn Corresponding author: zjhrzbb@sjtu.edu.cn

提出了许多在线算法<sup>[1-5]</sup>,它们根据输入队列的实时请求给交换结构分配连接模式。尽管这些在线算法可以获得 100% 的吞吐量,但当输入端口数  $N$  和传输线速率增大时其可扩展性将变得很差。

为了给每个输入/输出端口对(或者称为虚电路 VC)提供带宽保证且避免在线计算,文献[6]提出了一种称为路径交换的准静态算法,后来在文献[7]中被称作 Birkhoff-von-Neumann (BvN) 交换。这个算法先由平均输入业务矩阵得到一系列置换矩阵,然后根据这些矩阵预先安排好交换机的连接模式。由于连接模式不需要在线计算,所以其在线计算复杂度为  $O(1)$ ,可扩展性很强。同时,文献[8]提到了只要输入业务不超过预设的到达曲线<sup>[9]</sup>,那么这个算法就能达到 100% 的吞吐量和有界的端到端延时。然而,如果输入业务是突发的,BvN 交换机的性能将变得不可预测。

为了处理突发业务,文献[10]和文献[11]引入了一种两级的负载均衡 BvN(LB-BvN)交叉开关交换机。在第一级,输入业务被均匀分发到该级的各个输出端,使第二级输入业务均匀化;在第二级,通过运行  $N$  个循环移位置换矩阵实现交换。虽然这种方法在线计算复杂度为  $O(1)$ 且可以处理任意的业务模式,但是它会在输出端造成严重的包乱序(即使输入业务是平稳的)。为了解决乱序的问题,业界提出了一系列改进方案。文献[12-14]均引入了三级交换结构来解决包乱序问题,但是这样导致了较高的额外硬件成本。文献[11]在中间缓存管理中引入了先到先服务(FCFS)和时限最早优先(EDF)策略,但是 FCFS 要求中间缓存要有  $N$  倍的加速,而 EDF 要求每个时隙都要检查所有业务包的时限,这都使得交换机扩展性变差。文献[15]提出了一种基于反馈的 LB-BvN 交换机,这种方法需要频繁地向输入端反馈中间缓存的占用情况,从而加大了交换机的实现难度。

在本文中,为了增强突发业务下 BvN 交换机性能的同时减少包乱序问题,我们引入了业务偏射补偿机制,提出了带偏射的 BvN(D-BvN)交换机方案。许多包交换网络都采用偏射路由来解决冲突,如 Tandem Banyan 网络<sup>[16]</sup>、带纠错路由的双重混洗交换网络<sup>[17]</sup>、光突发交换机<sup>[18]</sup>以及可容错的片上网络<sup>[19]</sup>。与这些偏射机制不同的是,我们算法的目的是平稳输入业务的波动以及均衡各个 VC 间的负载。另外,我们的设计也与 LB-BvN 交换机随意分发业务包不一样:只有溢出的突发业务才会被偏射。

因此,业务包的乱序概率会显著下降。除此之外,我们的算法只需较少的缓存就可以获得接近 100% 的输入负载吞吐量,能够显著地减少业务包端到端延时,同时它继承了 BvN 交换机的准静态调度方式,其在线算法复杂度仍然是  $O(1)$ 。

本文余下部分如下安排:在第 2 节简要介绍 BvN 交换机的基本概念以及讨论它由于准静态调度带来的缺点;在第 3 节提出了带偏射补偿的交换机结构以及相关的调度算法;在第 4 节提供了 D-BvN 交换机的仿真条件,并给出了丢包率、最小缓存需求、包乱序概率以及业务包延时的仿真结果,同时与 BvN 交换机的相应性能做比较;最后总结本文。

## 2 BvN 交换机回顾及分析

在  $N \times N$  的 BvN 交换机中,每个输入端口都设置了  $N$  个虚输出队列(VOQ)。从输入端口  $i$  到输出端口  $j$  的业务包缓存在 VOQ<sub>ij</sub> 里(如图 1(a)所示,其中  $N=4$ )。BvN 交换机的准静态调度方法原理其实是双随机矩阵的 Birkhoff-von-Neumann 分解定理<sup>[20]</sup>。

记  $\lambda_{ij}$  为从输入端口  $i$  到输出端口  $j$  的平均业务速率,且  $\sum_i \lambda_{ij} \leq 1$  以及  $\sum_j \lambda_{ij} \leq 1$ 。根据输入业务矩阵  $[\lambda_{ij}]_{N \times N}$ ,可以找到一个容量矩阵  $[c_{ij}]_{N \times N}$ ,满足  $\lambda_{ij} \leq c_{ij}$  以及  $\sum_i c_{ij} = \sum_j c_{ij} = 1$ 。基于 BvN 分解定理<sup>[20]</sup>,  $[c_{ij}]_{N \times N}$  可以分解成若干置换矩阵的线性组合,其中每个置换矩阵代表交换机的一种连接模式,如图 1(b)所示。

在一个帧的连续  $F$  个时隙里面,我们根据 BvN 分解的权重来安排这些预设的连接模式(如图 1(c)所示,其中  $F=10$ )。通过周期性地运行这些连接模式,BvN 交换机保证了每个 I/O 对  $(i, j)$  的容量  $c_{ij}$ 。如果输入  $i$  和输出  $j$  在某个时隙内是连接的,我们就称 VC<sub>ij</sub> 得到了一个令牌,允许传输一个业务包。

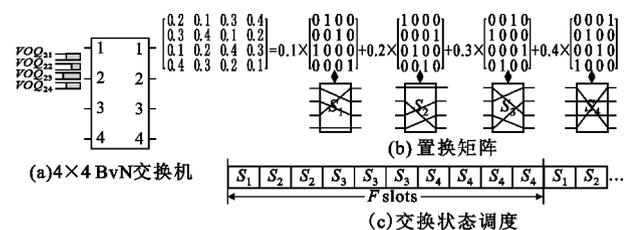


图 1 BvN 交换机原理

Fig. 1 The principle of BvN switch

BvN 交换机根据平均业务速率给 VC 提供容量

保证,所以它能够处理平稳的输入业务。如图 2(a) 所示,当输入业务比较平稳时,即使有突发业务到达(如图中  $t_1$  时刻),VOQ 也能够把暂未能服务的业务缓存起来,待输入速率降低后(如图中  $t_2$  时刻)再服务。由此可见,当输入业务平稳时,BvN 交换机能够获得高容量利用率和高吞吐量。但是,当输入业务具有突发性时,BvN 交换机的性能将变差。如图 2(b) 所示,在  $t_1$  时刻,输入业务速率比 VC 的容量小,VC 的容量得不到充分利用(即令牌被闲置);而在  $t_2$  时刻,大量业务到达 VC,输入业务的速率明显大于 VC 的容量,VOQ 缓存会被占满,从而导致丢包。由此可见,在突发业务下,BvN 交换机会同时带来低容量利用率和低吞吐量。总的来说,随着输入业务突发度的增长,BvN 交换机的容量利用率和吞吐量都会随之下降。

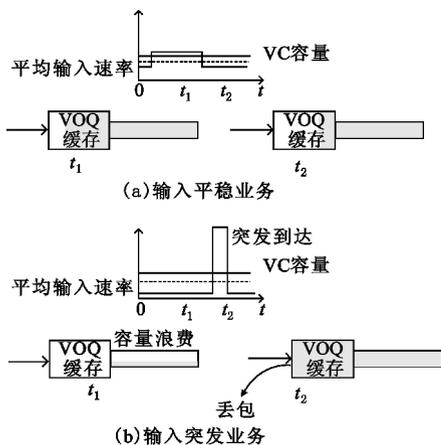


图 2 输入平稳和突发业务时 BvN 交换机性能对比  
Fig. 2 Comparison of BvN switch performance between smooth and bursty traffic

然而,交换机中的 VC 不大可能都在同一时刻出现突发,尤其是当交换结构的端口数  $N$  比较大的时候。这就意味着我们可以利用空闲 VC 的闲置容量去处理其他繁忙 VC 溢出的业务包,从而改善吞吐量和容量利用率。下一节中我们将根据这个想法设计带偏射补偿的 BvN 交换机。

### 3 D-BvN 交换机方案

基于上述的讨论,我们提出带偏射补偿的 Birkhoff-von-Neumann (D-BvN) 交换机,其主要思想是充分利用 BvN 交换机中不能被利用的空闲容量去处理溢出的业务包。那些在 BvN 交换机中被闲置的令牌主要起到以下两个作用:一是偏射溢出业务,二是给溢出业务提供重新进入系统的带宽。

如图 3 所示,为了实现 D-BvN 交换机,每个输入端口都设置一个回收缓存(记输入端口  $i$  的回收缓存为  $TB_i$ ),用于在偏射前暂时存放从饱和 VOQ 溢出的业务包。同时,每对编号相同的输入输出端口都有一条反馈连接,用于让偏射包重新进入系统。将到达第  $i$  个输入端口,且要被交换到第  $k$  个输出端口的包记为  $A_{ik}$ 。当  $A_{ik}$  到达时,D-BvN 交换机的包交换过程可以分成下面几步:

- 步骤 1: 如果  $VC_{ik}$  的缓存  $VOQ_{ik}$  未滿,  $A_{ik}$  进入  $VOQ_{ik}$  并且等待服务;否则,转到步骤 2;
- 步骤 2: 如果  $A_{ik}$  是一个未偏射包,转到步骤 3;否则,  $A_{ik}$  尝试进入  $i$  输入端口的回收缓存  $TB_i$ , 转到步骤 4;
- 步骤 3: 如果  $VOQ_{ik}$  中有偏射包,挑出其中一个偏射包放到  $TB_i$ ,  $A_{ik}$  进入  $VOQ_{ik}$  并等待服务;否则,  $A_{ik}$  尝试进入  $TB_i$ , 转到步骤 4;
- 步骤 4: 如果  $TB_i$  已滿,丢弃  $A_{ik}$ ;否则,  $A_{ik}$  进入  $TB_i$ 。当  $A_{ik}$  成为了  $TB_i$  的队头包且  $VC_{ij}$  当前有一个空闲令牌(也就是说  $VOQ_{ij}$  是空的),  $A_{ik}$  就通过  $VC_{ij}$  偏射到输出端口  $j$ , 转到步骤 5;
- 步骤 5: 如果  $j=k$ , 那么  $A_{ik}$  到达了它的目的端口;否则,将  $A_{ik}$  反馈到输入端口  $j$ , 重复步骤 1。

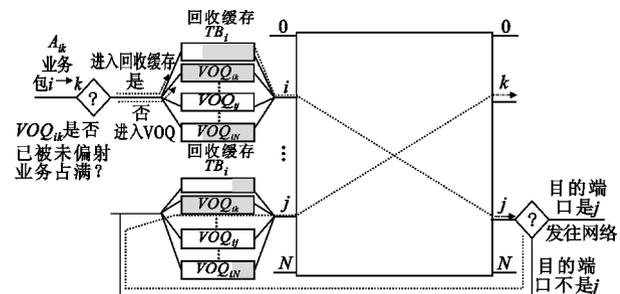


图 3 溢出业务包的偏射过程  
Fig. 3 Deflection process of overflow packet

由于交换机相同编号的输入输出端口通常在同一个线卡上<sup>[4]</sup>,故 D-BvN 交换机中的反馈连接只需要很少的硬件成本。另外,与 BvN 交换机相比,D-BvN 交换机只是分别在输入输出端各添加了一个判断模块,故 D-BvN 交换机没有引入很多额外的在线计算,其在线计算复杂度应与 BvN 交换机一样是  $O(1)$ 。

### 4 D-BvN 交换机性能评估

为了评估 D-BvN 交换机的性能,并与 BvN 交

交换机的性能比较,我们对这两种交换机做了性能仿真。通过仿真我们可以看到,D-BvN 交换机的吞吐量相比 BvN 交换机有显著的提升。在吞吐量较高的情况下,D-BvN 交换机只带来了很低的包乱序概率,同时其业务包延时也比 BvN 交换机的延时低。

### 4.1 仿真条件

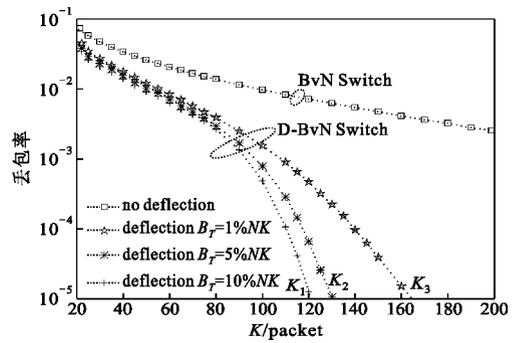
在仿真中,我们假设交换机是一个分时隙的系统,并且输入业务是均匀的,也就是说每个 VC 的平均输入业务速率都相等,同时它们都有相同的 VOQ 缓存  $K$  以及容量  $C$ 。在每个端口处,我们都设置了相同大小的回收缓存  $B_T$ 。每个 VC 的输入业务都是离散时间的马尔可夫调制 on-off 业务源,它们的 on 期和 off 期状态转移概率均为  $\alpha$  和  $\beta$ 。在 on 期中,每个时隙会以一定概率  $\hat{\lambda}$  产生一个业务包,而在 off 期中则没有业务包到达。所以,业务源的峰值速率为  $\hat{\lambda}$ ,平均到达速率  $\bar{\lambda} = \frac{\beta\hat{\lambda}}{\alpha+\beta}$ 。这里,类似于突发长度的定义<sup>[1]</sup>,我们定义业务的突发度  $b = \frac{1}{\alpha+\beta}$ 。我们

使用一组  $N$  个循环移位置换矩阵,在每个时隙随机抽出其中一个置换矩阵给交换机做交换状态配置,从而保证了每个 VC 的容量  $C$  都相等。

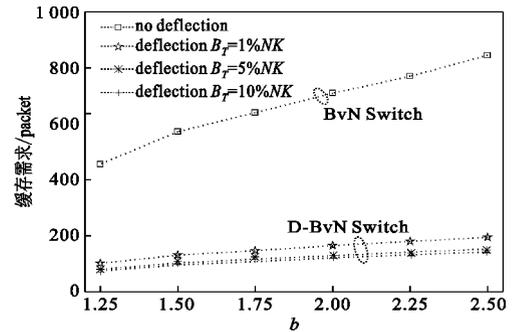
### 4.2 丢包率和缓存需求

如图 4(a) 所示,我们首先进行了 BvN 交换机和 D-BvN 交换机的丢包率比较。在仿真中,我们给  $B_T$  设置了不同的值(分别是每个端口所有 VOQ 缓存总和的 1%、5%、10%)进行比较。可以看出,D-BvN 交换机的丢包率比 BvN 交换机有明显的下降。这是因为在相同的 VOQ 缓存下,D-BvN 交换机利用空闲容量偏射溢出业务,实质上是给溢出业务提供了一个动态缓存,避免了丢包的发生。另一方面,我们也可以看到,随着回收缓存的增大,丢包率会进一步下降。这是因为实际系统中,溢出业务和空闲容量不是同时产生的,如果有更大的回收缓存,就可以让更多的溢出业务等待空闲容量的到来,从而减少丢包。

图 4(b) 所示是 BvN 交换机和 D-BvN 交换机对缓存的需求仿真比较。这里我们定义缓存需求为使系统丢包率达到  $10^{-5}$  所需的最小 VOQ 缓存。可以看到 BvN 交换机对缓存的需求比 D-BvN 交换机的需求大得多。这是因为 D-BvN 交换机偏射溢出业务的时候,相当于利用空闲容量做一个动态缓存来避免丢包,从而减少了对 VOQ 缓存的需求。



(a)  $N=64, \hat{\lambda}=0.8, \bar{\lambda}=0.98/64, \alpha=0.49, \beta=0.0096, b=2$



(b)  $N=64, \hat{\lambda}=0.8, \bar{\lambda}=0.98/64$

图 4 丢包率与缓存需求的仿真结果比较图

Fig. 4 Comparison of simulation results between traffic loss rate and VOQ buffer requirement

### 4.3 包乱序概率

偏射会在输出端导致业务包乱序。一个数据包只有被偏射之后,它才会在输出端导致乱序。因此,可以用业务被偏射的概率来分析包乱序。图 5 给出了 3 种不同回收缓存大小下业务被偏射概率随 VOQ 大小变化的仿真数据图。从图 5 看出,在 3 种不同回收缓存大小的情况下,当 D-BvN 交换机的丢包率为  $10^{-5}$  时(对应于图 4 和图 5 中的 VOQ 为  $K_1, K_2, K_3$  这三点),D-BvN 交换机的包乱序概率分别为  $P_{d1}$  = 0.011 46,  $P_{d2}$  = 0.009 57,  $P_{d3}$  = 0.005 3。可以看出,这些概率都很低,不会在输出端造成严重的包乱序。

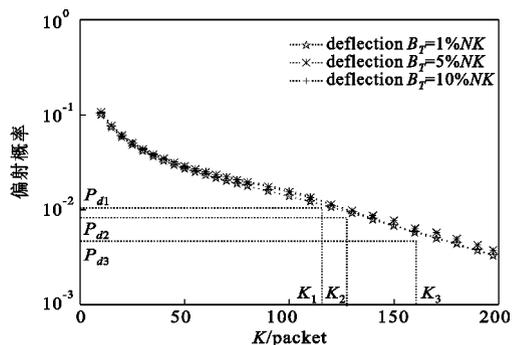


图 5 D-BvN 交换机业务偏射概率的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of packet deflection probability in D-BvN switch

#### 4.4 业务包延时

通过仿真,我们比较了系统丢包率均为 $10^{-5}$ 时, BvN 交换机和 D-BvN 交换机的业务包延时,并发现 D-BvN 交换机的业务包延时比 BvN 交换机的业务包延时有显著的下降,如图 6 所示。

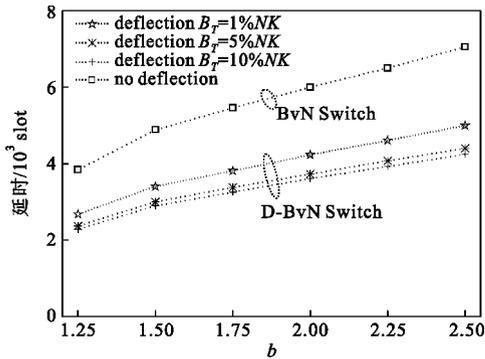


图 6 业务包延时的仿真结果比较图

Fig. 6 Comparison of simulation results of packet delay

因为相对于 D-BvN 交换机来说, BvN 交换机需要更多的 VOQ 缓存才能使系统丢包率达到 $10^{-5}$ (见图 4(b)),所以在 BvN 交换机中,受阻塞的业务包会在 VOQ 缓存中形成很长的队列;但在 D-BvN 交换机中,VOQ 缓存较小,受阻塞的业务包不会形成很长的队列。根据排队论中的 Little's Law, D-BvN 交换机的业务包排队延时应该比 BvN 交换机的业务包排队延时要小。同时,由于 D-BvN 交换机的偏射概率很低(见图 5),所以业务包的平均偏射延时也很低。因此总的来说, D-BvN 交换机的业务包延时要低于 BvN 交换机的业务包延时。

#### 5 结束语

为了避免 BvN 交换机在突发业务下的缺点,我们引入了偏射机制来增强 BvN 交换机的性能。D-BvN 交换机有以下特点:

- (1) 在突发业务下, D-BvN 交换机只需较少的 VOQ 缓存就能获得与 BvN 交换机相同的吞吐量;
- (2) D-BvN 交换机只引入了少量的额外硬件要求且在线计算复杂度与 BvN 交换机一样为  $O(1)$ ;
- (3) 尽管偏射会影响业务包的输出顺序,但是在丢包率较低的情况下,包乱序概率几乎可以忽略不计;
- (4) D-BvN 交换机能显著减少业务包延时。

#### 参考文献:

[1] McKeown N. The iSLIP scheduling algorithm for input-

queued switches [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(2): 188-201.

- [2] Hu Bing, Yeung K L, Zhang Zhao-yang. An efficient single-iteration single-bit request scheduling algorithm for input-queued switches [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(1): 187-194.
- [3] Danilewicz G, Dziuba M. The new MSMPS Packet Scheduling Algorithm for VOQ Switches [C]//Proceedings of 2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing. Poznan: IEEE, 2012: 1-5.
- [4] He Chunzhi, Yeung K L. D-LQF: An efficient distributed scheduling algorithm for input-queued switches [C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Communications. Kyoto: IEEE, 2011: 1-5.
- [5] Yu Xia, Chao H-J. Module-level matching algorithms for MSM Clos-network switches [C]//Proceedings of 2012 IEEE 13th International Conference on High Performance Switching and Routing. Belgrade: IEEE, 2012: 36-43.
- [6] Lee T T, Lam C H. Path switching—a quasi-static routing scheme for large-scale ATM packet switches [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(5): 914-924.
- [7] Chang Chengshang, Chen Wen-Jyh, Huang Hsiang-yi. On service guarantees for input-buffered crossbar switches: a capacity decomposition approach by Birkhoff and von Neumann [C]//Proceedings of 1999 Seventh International Workshop on Quality of Service. London: IEEE, 1999: 79-86.
- [8] Chan M C, Lee T T, Liew S Y. Statistical performance guarantees in large-scale cross-path packet Switch [C]//Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Communications. New Orleans, LA: IEEE, 2000: 1748-1752.
- [9] Cruz R L. A calculus for network delay. I. Network elements in isolation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1): 114-131.
- [10] Chang C S, Lee D S, Jou Y S. Load balanced Birkhoff-von Neumann switches, part I: one-stage buffering [J]. IEEE Computer Communication, 2002, 25(6): 611-622.
- [11] Chang C S, Lee D S, Jou Y S. Load balanced Birkhoff-von Neumann switches, part II: multistage buffering [J]. IEEE Computer Communication, 2002, 25(6): 623-634.
- [12] Antonakopoulos S, Fortune S, McLellan R, et al. Collector-based cell reordering in load-balanced Switch fabrics [C]//Proceedings of 2013 IEEE 14th International Conference on High Performance Switching and Routing. Taipei: IEEE, 2013: 1-6.

- [13] Wang Xiaolin, Cai Yan, Xiao Sheng, et al. A three-stage load-balancing Switch [C]//Proceedings of IEEE 27th Conference on Computer Communications. Phoenix, AZ: IEEE, 2008: 1993-2001.
- [14] Hu Bing, Yeung K L. Load-balanced three-stage Switch Architecture [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(1): 502-509.
- [15] Hu Bing, He chunzhi, Yeung K L. On the scalability of feedback-based two-stage Switch [C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications. Ottawa, ON: IEEE, 2012: 2956-2960.
- [16] Bassi S, Decina M, Giacomazzi P, et al. Pattavina A. Multistage shuffle networks with shortest path and deflection routing for high performance ATM switching; the open-loop shuffleout [J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(10): 2881-2889.
- [17] Liew S C, Lee T T. N log N dual shuffle-exchange network with error-correcting routing [C]//Proceedings of 1992 IEEE International Conference on Communications. Chicago, IL: IEEE, 1992: 262-268.
- [18] Hsu Ching-Fang, Liu T L, Huang Nen-fu. Performance analysis of deflection routing in optical burst-switched networks [C]//Proceedings of Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York: IEEE, 2002: 66-73.
- [19] Kohler A, Radetzki M. Fault-tolerant architecture and deflection routing for degradable NoC switches [C]//Proceedings of 3rd ACM/IEEE International Symposium on Networks-on-Chip. San Diego, CA: IEEE, 2009: 22-31.
- [20] Chang C S, Chen W J, Huang H-Y. Birkhoff-von Neumann input buffered crossbar switches [C]//Proceedings of 2000 Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Tel Aviv, Israel: IEEE, 2000: 1614-1623.

## 作者简介:



张景辉(1988—),男,广东人,2011年于上海交通大学获学士学位,现为上海交通大学硕士研究生,主要研究方向为高性能交换网络;

ZHANG Jing-hui was born in Guangdong Province, in 1988. He received the B. S. degree from Shanghai Jiaotong University in 2011. He is now a graduate student. His research concerns high performance switching network.

Email: zjhrzbb@sjtu.edu.cn

叶通(1976—),男,福建人,分别于1998年和2001年获电子科技大学学士学位和硕士学位,2005年于上海交通大学获博士学位,现为上海交通大学副教授,主要研究方向为宽带交换

网络结构、网络算法设计和性能分析和光网络系统;

YE Tong was born in Fujian Province, in 1976. He received the B. S. degree and the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China, and the Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 1998, 2001 and 2005, respectively. He is now an associate professor. His research concerns broadband switching architecture, network algorithm design and performance analysis, and optical network system.

Lee T T (1948—),男,生于中国台湾,1971年于台湾国立成功大学获学士学位,分别于1976年和1977年获纽约理工大学硕士学位及博士学位,1977年至1983年于美国AT&T贝尔实验室工作,1983年至1993年在Bellcore(现为Telcordia Technologies)工作,1991年至1993年于纽约理工大学任教授,1993年至2010年于香港中文大学任讲席教授,现于上海交通大学任致远讲席教授,IEEE Fellow, HKIE Fellow, 主要研究方向为宽带交换理论、网络性能分析、无线通信网络;

Lee T T was born in Taiwan, in 1948. He received the B. S. degree from National Cheng Kung University, Taiwan, in 1971, and the M. S. degree and the Ph. D. degree from Polytechnic University of New York, in 1976 and 1977, respectively. He was with AT&T Bell Laboratories, Holmdel, NJ, from 1977 to 1983, and Bellcore, currently Telcordia Technologies, Morristown, NJ, from 1983 to 1993. He was a Professor at Polytechnic University of New York from 1991 to 1993, and a Chair Professor at the Chinese University of Hong Kong from 1993 to 2010. He is currently working as a Zhiyuan Chair Professor at Shanghai Jiaotong University. He is a fellow of IEEE and HKIE. His research interests include broadband switching principles, network performance analysis, and wireless communication network.

闫芳芳(1984—),女,山东人,2004年于中国海洋大学获学士学位,2010年于上海交通大学获博士学位,现为上海交通大学讲师,主要研究方向为光交换及组播、分组交换结构及调度算法、数据中心网络;

YAN Fang-fang was born in Shandong Province, in 1984. She received the B. S. degree from Ocean University of China, and the Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2004 and 2010, respectively. She is now a lecturer. Her research interests include optical switching and multicasting, packet switching architecture and scheduling algorithm, and data center network.

胡卫生(1964—),男,湖北人,1986年于清华大学获学士学位,1989年于北京科技大学获硕士学位,1997年于南京大学获博士学位,现为上海交通大学教授,主要研究方向为光交换和光网络。

HU Wei-sheng was born in Hubei Province, in 1964. He received the B. S. degree from Tsinghua University, the M. S. degree from Beijing University of Science and Technology and the Ph. D. degree from Nanjing University in 1986, 1989 and 1997, respectively. He is now a professor. His research concerns optical switching and optical network.