

光分组交换网的计算机仿真

作者：王春华

专业：通信与信息系统

导师：黄肇明



上海大学出版社

· 上海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2002)

Simulation Studies of Optical Packet Switching Networks

Candidate: Wang Chun-hua

Major: Communication and Information System

Supervisor: Prof. Huang Zhao-ming

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：曾庆济	教授，上海交大电子信息工程学院	200030
委员：陈建平	教授，上海交大电子工程系	200030
方祖捷	研究员，中科院上海光机所	201800
林如俭	教授，上海大学通信学院	200072
汪 敏	教授，上海大学通信学院	200072
导师：黄肇明	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

曾庆济	教授, 上海交大电子信息工程学院	200030
陈建平	教授, 上海交大电子信息工程学院	200030
徐安士	教授, 北京大学电子学系	100871

评议人名单:

胡卫生	上海交大电子信息工程学院	200030
方祖捷	研究员, 中科院上海光机所	201800
陈高庭	研究员, 中科院上海光机所	201800
方振和	教授, 上海大学电子物理所	201800
王子华	教授, 上海大学通信学院	200072
叶家峻	教授, 上海大学通信学院	200072

答辩委员会对论文的评语

IP/WDM 光分组交换技术是光纤通信领域主要发展方向之一。采用计算机仿真模拟研究对全面展开光分组交换网的研究具有重要意义。论文选题正确,具有学术前沿性。

作者在广泛查阅文献资料的基础上,针对光分组交换的一些关键问题展开研究。建立了光分组交换节点物理特性的仿真系统,对节点的各种参数的影响进行了仿真研究,该工作内容为进一步深入进行光分组交换提供了很好的研究平台;在理论上分析并讨论了光缓冲器对光分组交换节点物理特性的影响;提出了基于波长路由思想,保证高优数据丢包率要求的分离信道路由算法,具有较好的实用意义;提出了双波长 Round-Robin 波长分配原则,有效地解决了 IP/WDM 单纤环网数据发送不公的问题;完成了 1 550 nm 光纤 CATV 外调制发射系统样机的研制,达到国内先进水平,表明作者具有良好的实验动手能力。

论文工作内容充实,综述全面、条理清晰、文笔流畅,学风严谨。表明论文作者在本学科领域掌握了坚实宽广的基础理论、系统深入的专门知识,具有较强的独立从事科研工作的能力。

论文作者在答辩过程中,概念论述正确,表达清晰,回答问题正确。论文达到上海大学博士学位论文要求。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过王春华同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席: **曾庆济**

2002 年 3 月 12 日

摘 要

针对占主导地位的数据业务、光分组交换 (OPS) 网将分组交换模式的灵活性和统计复用特性与快速、透明的 WDM 光波长路由/交换完美地结合了起来, 它是最具潜力的构建未来 Internet 信息高速公路的网络技术.

本论文的主要研究工作包括:

(1) 建立了基本的光分组交换 (OPS) 节点物理层特性研究的仿真系统. 在建立的仿真平台上, 对影响 OPS 节点 BER 性能的各种基本参数, 如节点单元器件的串扰、光输出缓冲器长度、级联节点数目、节点业务率、信号的幅值波动、数据的延迟抖动等, 进行了仿真研究.

同时推导并得出各种参数对 BER 影响的解析结果, 比较解析结果和仿真结果, 两者非常一致, 由此证明了本论文建立的仿真系统的可靠性.

首次对 B&S 分组交换节点中二次串扰的影响进行了讨论, 结果表明, 虽然光缓冲器会使 OPS 节点的串扰数大大增加, 但相对于一次串扰而言, 二次串扰的影响依然很小, 可忽略不计.

首次对光输出缓冲器对 OPS 节点串扰的相干特性的影响进行了研究, 导出了 B&S 型 OPS 节点传输特性的一般数学模型. 由此分析了光分组交换节点中, 存在光输出缓冲器时的串扰噪声的来源及其性质. 讨论了在光缓冲器排队延迟和路由路径延迟共同作用下, 串扰干涉噪声的统计特性. 数值计算和仿真结果表明: 光分组交换节点中, 光缓冲器的存在导致了串扰功率

代价的大大增加。由于缓冲器排队延迟的影响, 非相干串扰比例大大增加; 且串扰与信号、串扰与串扰之间的随机相干特性引起的功率代价的相对随机程度下降。因此可以得出结论, 当缓冲器较长时, 所有串扰均可认为与信号无关, 且串扰之间也互不相关。这一结论对今后简化 OPS 节点串扰影响的讨论具有重要的意义。

(2) 提出了基于波长路由的控制来提高高优先级别数据丢包率 PLR 性能的方法。光分组交换网中, 当高优先级别数据有 PLR 方面的 QoS 要求时, 为实现高优数据 PLR 要求, 论文提出了两种算法——为高优数据预留波长信道的算法和高低优数据分离波长信道路由的算法。理论分析和数值计算表明: 高低优数据分离信道路由算法可以较好地实现高优数据的 PLR 要求。

(3) 对波长信道分离路由法和前人提出的缓冲器分段法进行了比较和优化设计。结果表明: 两者都可以实现对高优数据的 PLR 要求, 但适用范围有所不同。缓冲器分段法适于缓冲器较长的情况; 而本文提出的波长信道分离路由法要求全波长变换, 对缓冲器的长短无要求。鉴于缓冲器会带来延迟抖动、串扰增加等诸多不利影响。目前 OPS 节点的发展趋势是尽可能减小输出缓冲器长度。因此本文提出的高低优数据分离信道法具有较高的实用价值。

(4) 建立了 IP/WDM HORNET 环网的图形化仿真系统。在原有的 HORNET 的单波长 Round-Robin 波长分配原则下, 对三种可能的控制非本地目的地址的下载数据方法进行了网络逻辑性能的仿真。仿真中, 发现了 HORNET 采用的单波长 Round-Robin 波长分配方法具有本质上的向各节点发送业务不公平的特征, 而且这一缺陷不能通过改进业务接入方法而加以消除。

为解决向各节点数据发送不公平的问题, 本论文首次提出了双波长 Round-Robin 地址分配原则. 仿真结果表明, 双波长 Round-Robin 原则可以很好地解决数据发送的不公平问题. 本论文根据节点的改变程度——无外加上载信道、外加一条外加上载信道、外加两条上载信道的情况, 在采用了最长队列优先接入算法、最少下载数据排队原则、上载信道充分利用原则下, 对双波长 Round-Robin 分配原则的 HORNET 网进行了仿真和讨论, 并对各种情况的网络性能进行了比较.

(5) 对 1 550 nm 光纤 CATV 外调制发射机各主要部分的工作原理进行了研究, 并完成了整个实验样机. 采用两级级联外调制器的方法实现了对调制器的非线性补偿: 以消除三阶非线性; 利用高频抖动法实现了对 SBS 的抑制; 利用检测导频二次谐波信号的方法, 对调制器工作点的稳定进行反馈控制; 通过精确控制两路射频调制信号的相位和幅值, 使调制器获得了最大线性调制度.

关键词 光分组交换网, 误码率, 丢包率, 串扰, 光缓冲器, 排队延迟, 数据发送率

Abstract

Coping with the predominated data traffic of Internet, optical packet switching (OPS) networks make a perfect combination of the flexibility and the statistical multiplexing of the packet switching with the huge, fast and transparent optical switching of WDM technology. Optical packet switching has been considered the most promising networking technology for the next generation information infrastructure.

Considering the high cost and the developing state of the relative photonic devices, it is difficult to set up OPS network experiments or test-beds for most laboratories. Therefore, the Simulation of OPS networks features its potential in the general, statistic, and dynamic study of new ideas, methods, technologies of the key devices, network architectures, network protocols and the network management of OPS networks.

The main works of this paper include:

(1) A visual and graphical simulation system for the study of physical property of B&S OPS nodes is achieved. On the simulation platform, the effects of various node parameters on BER performance of OPS nodes are simulated respectively, such as, the effects of the crosstalk of node devices, the length of optical output buffers, the numbers of cascaded OPS nodes, the traffic load, the fluctuation of data amplitude and the fluctuation of data delay.

In addition, the analytical results of above effects are obtained as well. The agreement between the analytical results and the simulation results sufficiently proves the reliability of the OPS simulation system

built in the paper.

(2) For the first time, the effect of optical output buffers on the coherent property of crosstalk contributions of OPS nodes is investigated analytically. By the derivation of the propagation function of B&S OPS nodes, the coherent properties of crosstalk contributions are discussed. And the statistics of crosstalk interferential noise, due to the randomness of queuing delay and routing path delay, is analyzed and figured out by simulation.

It is concluded that the presence of optical output buffers leads to a dramatic increase of power penalty of the crosstalk interferential noise, but the relative randomness of the power penalty decreases. Therefore, when the buffer length is long enough, all the crosstalk contributions can be simply considered as incoherent with one another, and with the desired signal as well.

(3) An approach called wavelength channel separating algorithm, which is based on wavelength routing concept, to improve the packet loss rate (PLR) for the higher priority traffic in OPS networks is proposed and analyzed. By the calculation and optimization, the comparison of the new approach with the partial buffer sharing algorithm proposed previously is presented. Both two algorithms can promise the improvement of PLR for the higher priority traffic, but they suit to different cases. The partial buffer sharing algorithm performs better in OPS nodes with longer buffers, while the wavelength channel separating algorithm requires full-wavelength conversion, consequently leading to a short-buffer requirement in OPS nodes. Considering the performance deterioration caused by long optical buffers, the wavelength channel separating algorithm will feature more feasibility.

(4) A visual graphical simulation system for HORNET IP/WDM networks is accomplished. By simulation, an intrinsic weakness of Round-Robin wavelength assignment—the unfairness of traffic delivery to different nodes is found, and it can not be solved by improving traffic accessing algorithms.

To solve the problem, a two-wavelength Round-Robin assignment is proposed. By simulation, it is shown that the two-wavelength Round-Robin assignment works very well in solving the unfairness of traffic delivery.

By simulation, the optimized performance of HORNET under the two-wavelength Round-Robin assignment is explored for three scenarios—without extra adding path, with one and two-extra adding path respectively, under the two-wavelength Round-Robin assignment along with the adoption of the algorithm of longest-queue first, the algorithm of least-traffic dropping and the algorithm of full-use of the extra adding path.

(5) A prototype of 1 550 nm optical fiber CATV external-modulation transmitter is developed. In the system, two cascaded external modulators are used to eliminate the third order nonlinear term, so as to compensate the non-linearity of the modulation. A high frequency dithering technique of optical light is used and performs well in the suppression of the nonlinear SBS effect. The stability of the working point of modulator is realized by the feedback controlling of the second order harmonic of a guide signal. Moreover, the realization of both the perfect out-phase and the proper amplitude proportion of two RF signals promises the best linear modulation degree.

Key words optical packet switching network, bit error rate, crosstalk, packet loss rate, queuing delay, traffic delivery rate.

目 录

第一章 光分组交换网概述	1
1.1 Packet/WDM 是未来全光网的发展方向	1
1.2 Packet/WDM 光网的关键技术和关键器件	8
1.3 光分组交换网的研究状况	14
1.4 本论文的主要研究内容、创新点及意义	15
第二章 光分组交换节点的图形化仿真	20
2.1 可视图图形化物理层仿真的意义	20
2.2 仿真平台主要模块的数学模型	22
2.3 OPS 节点物理特性的仿真	34
2.4 OPS 节点的二次串扰的讨论	45
2.5 本章小结	46
第三章 输出光缓冲器对 OPS 节点串扰相干特性的影响 ...	49
3.1 引 言	49
3.2 OPS 节点中输出缓冲器对串扰相干特性的影响 ...	53
3.3 计算与仿真结果	60
3.4 本章小结	63
第四章 OPS 节点中改善高优数据丢包率方法的理论分析	65
4.1 引 言	65
4.2 OPS 节点基本排队模型	67
4.3 预留波长信道法	69
4.4 高低优数据路由信道分离法	76

4.5 高低优数据缓冲器分段控制算法	79
4.6 两种算法的优化与比较	82
4.7 本章小结	86
第五章 HORNET MAN 仿真及数据发送公平性的实现	88
5.1 Round-Robin 原则下 HORNET 仿真及 问题的提出	88
5.2 双波长 Round-Robin 原则的提出及网络仿真	99
5.3 双波长 Round-Robin 路由网络性能的最佳化	105
5.4 双波长 Round-Robin 多节点 HORNET 仿真	108
5.5 本章小结	111
第六章 1550nm 外调制光纤 CATV 发射系统的研究	112
6.1 引言	112
6.2 系统构成及其工作原理	113
6.3 系统测试结果和讨论	123
6.4 本章小结	128
参考文献	129
致 谢	143

第一章 光分组交换网概述

1.1 Packet/WDM 是未来全光网的发展方向

人类的社会属性和对舒适便利的本能追求,使得人类对通信业务的需求变得无止境.现有的有线和无线通信技术已经为我们提供了比以往更多、更便利和快捷的交流沟通、学习工作、娱乐的途径.由无线和有线技术构建的 Internet 还在以指数增长的速度向社会的各个领域、各个角落渗透与扩展.未来的 Internet 是什么样,这尚为未知数,正如,主持构建美国 NGI(Next Generation Internet)的 M. Maeda 先生在 2001 年国际光通信年会(OFC'01)上所说: Internet 的发展,激发了人类构建网络和应用网络的无穷创造力,但现在我们所能看到的只是冰山一角^[1].而依本论文作者之拙见,未来的网络应该像人体的健全神经传导网络一样,使整个世界的信息在这样的健全而无所不至的信息网络上传递、交流,就像人的感觉从一个神经末梢到另一个神经末梢.

从有线传输网的角度,要构筑这样的 Internet 网络,并能够在网络上快速、高效地传输各种各样的信息业务,要求同时具有高速、大容量的传输和交换技术的支持.光纤 DWDM 波长复用技术,全波光纤和宽带光放大技术的成熟和发展,为网络链路的宽带传输提供了近乎无限带宽和超长距离传输的可能.但

这同时也加剧了网络节点上电子路由/交换能力的瓶颈效应。解决瓶颈的方案：一是靠目前电子交换技术的继续发展；二是全光交换技术的发展。

1.1.1 电子技术的发展

集成电路技术的发展、智能化电路设计方法的出现使得目前基于 ATM、IP 和 SDH 交叉连接的电子技术方案仍有相当的发展空间，并且从网络运营者的角度来看，设备价格是首要考虑的问题。而全光网由于缺乏标准，光设备的造价及技术成熟性与可靠性尚不尽如人意。因此，电子交换升级的方法在一定时期内仍可满足业务发展的需要。例如 Neo Network 公司利用 ATM 交换技术的千兆 IP 路由器可达到 512 Gbit/s 的交换速率^[2]。但是从长远发展的角度来看，每年 5 % 的电子 TDM 技术的发展远远不能适应每年 8 % 的用户网络带宽的增长需求。短期看来这一差异并不显著，但长期而言，如果没有突破性的技术出现，这一差异终究会限制网络的运行速度，并且，由于功耗/制冷和电子芯片的互连问题而导致的交换瓶颈问题，到现在还无突破性的技术手段加以解决^[7-9]。而反观全光交换，虽然目前的光子交换器件的可靠性、价格等还不尽人意，但其巨大的技术突破与上升空间，是电子交换技术所不能比拟的。因此，只有全光交换技术才是解决未来网络路由交换瓶颈最根本的方法。图 1.1 给出了电子交换和光交换的现状和发展比较^[19]。

1.1.2 全光网技术

1.1.2.1 WDM 传输技术

点到点的光纤传输链路上，光 DWDM、光 TDM 技术，宽带光放大技术、单信道高码率传输技术和全波光纤的研制成功

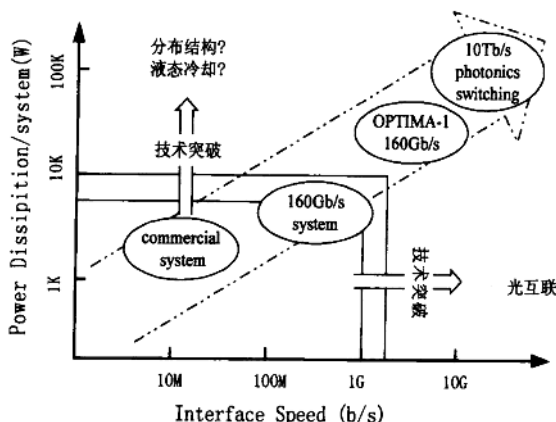


图 1.1 电子交换和光子交换的发展趋势

为单根光纤提供了近乎无限的传输带宽(仅在 1.5 μm 波段的带宽可达 300 Tbit/s)。最新的研究结果表明,采用 OTDM 技术的单波长信道传输码率可高达 640 Gbit/s,传输距离超过 120 km;各种各样的光放大技术^[23-26],如:EDFA、Raman 放大、TDFA、碲基氟化物的 EDFA 等,可以实现从 1450~1650 nm (包括 XS+S+C+L+XL band)约 200 nm 带宽的光放大;而密集波分复用技术的发展已可实现 1000 个波长的密集复用传输实验^[116]。目前的实验室单纤传输系统的实验水平已超过 7.4 Tb/s,传输距离超过 400 km。商用系统也普遍达到 32chx40Gbit/s。因此,从链路传输的角度,光纤可为未来的信息业务提供其他技术无可比拟的传输容量。但由此产生的问题是,现有的网络节点的交换和接入能力远远跟不上传输能力的发展。因此网络链路上传输容量的