

上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 52



WDM丢失网络若干问题的研究

- 作者：唐矛宁
- 专业：运筹学与控制论
- 导师：王汉兴



上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 52



WDM丢失网络若干问题的研究

- 作者 唐 承 宁
- 专业 运 筹 学 与 控 制 论
- 导师 王 汉 兴

A Dissertation Submitted To Shanghai University for the
Degree of Doctor (2005)

Study On WDM Loss Networks

Candidate: Tang Maoning

Supervisor: Wang Hanxing

Major: Operations Research and Control Theory

Shanghai University Press

• Shanghai •

摘 要

本博士论文的工作主要分两个方面：一方面是对 WDM 光纤网络进行路由和波长分配算法研究,另一方面就是对随机环境中 WDM 丢失网络(Loss networks)进行平衡性分析和阻塞概率的计算。

第一章主要是概述研究工作背景和本文的主要工作。随着网络化时代的到来,人们对信息的需求与日俱增,可以预言,波分复用全光网的研究和实用化进程,必将使网络的性能和业务的提供能力跨上一个新的台阶,特别是对我国这样一个幅员辽阔,具有庞大干线网的国家。

第二章主要研究了 WDM 光纤网络中任播形式请求的路由和波长分配算法,任播是一种新兴的网络服务,是 IPV6 的一个新特征,作为下一代 Internet 新兴的服务方式,任播为我们展开了广阔的探索空间。任播技术发展的时间比较短,但具有提高网络性能、效率以及可靠性等优点。目前,对 WDM 光纤网络中单播和多播形式请求的路由和波长分配问题已经有了很多工作,并且一直是国内外这几年的研究热点。据我们所知,对 WDM 光纤网络中任播形式的请求,这方面的工作我们是最早开始的。在这一章里,我们不仅总结了目前已经存在的 WDM 光纤网络结构、拓扑结构、研究中常用的路由/波长分配算法,而且研究了 WDM 光纤网络中任播形式请求的路由和波长分配问题,给出了一个新颖的路由和波长分配算法来研究静态形式和动态形式任播请求并进行了计算机模拟分析。

第三章简单介绍了马氏过程的若干知识,主要包括可逆性和 Kolmogorov 准则,附带的,在本章,我们给出了判别离散状态马氏链常返性的一个充分必要条件,在此基础上给出了一个简单定理来判断马氏链平稳分布是否存在。本章内容可以看作是后两章数学分析的基础。

第四章开始研究 WDM 丢失网络的平衡性分析,近年来,对丢失网络的数学理论的研究及其对通讯系统的设计和控制又重新引起了越来越多研究者的兴趣。之所以要研究丢失网络,一个主要的目的就是为获得网络性能,例如丢失概率的近似计算。丢失网络可以代表很多种网络,在本文中我们主要指的是 WDM 网络,当然也可以指电路转换网络。电路转换网络和 WDM 网络的主要不同就在于在电路转换网络中,每个链路上的信道(channel)是没有区别的,而在 WDM 网络中,每个链路上的不同信道意味着不同的波长,众所周知,乘积形式的解是服务网络最出色的成果,也是许多服务网络共同具有的特征。在本章中,我们对 WDM 丢失网络中有路由选择的请求进行了平衡性分析,得到的结果是乘积形式的解。

第五章则对有路由选择的 WDM 丢失网络的丢失概率进行了计算。首先我们详细介绍了目前为止在电路转换网络和 WDM 网络中,研究工作中对阻塞概率已有的研究方法和著名的研究模型,进而给出带有路由选择的 WDM 丢失网络阻塞率的计算方法。

第六章是本文的总结和未来研究展望。

关键词 马氏过程,平衡分布,阻塞率,丢失网络,WDM 网络,路由,波长,任播

Abstract

The Ph. D. thesis mainly includes two parts: one is the study of the routing and wavelength assignment for WDM optical networks, the other is the equilibrium analysis and computation of the blocking probabilities for the WDM loss networks.

In the first chapter, we outline the background and the main tasks of our study. With the coming of the network times, the need for the information has been on the rise. It can be predicted that with the study and realization of the WDM optical networks, the performance and offer ability of the network will go to a new step, especially for our country with a large backbone network and a vast territory.

In the second chapter, we mainly study the routing and wavelength assignment for anycast in WDM optical networks. Anycast is a new network service defined in IPV6. As a new network service, it provides a huge space for our study. Though the development time of anycast is not very long, anycast has the following virtues: improve the network performance, efficiency and reliability. Now many work have been done on the unicast and multicast for routing and wavelength assignment in WDM networks. But to our best knowledge, in the literature, there is still no report on the

routing anycast data in the WDM networks. In this chapter, we not only summarize the existing WDM optical network architecture, topology architecture and usually used routing and wavelength assignment algorithms, but also give a novel routing and wavelength assignment algorithm for anycast in WDM networks. We give the algorithms under the static and dynamic case and give the computer imitation analysis.

In the third chapter, we introduce some knowledge for the Markov process including the reversibility and Kolmogorov criteria. By the way, in this chapter, an if and only if method is given, which can prove whether the Markovian chain is recursion or not. Applying this method, we have given an easy theorem to prove whether the stationary distribution exist. This chapter can be viewed as the base of the mathematics analysis of the following chapters.

In the fourth chapter, we study the equilibrium analysis for WDM loss networks. In recent years, there has been a resurgence of interest in the mathematical theory of loss networks and in its application to the design and control of telecommunication systems. The main reason to study the loss networks is to obtain the network performance, for example the approximation computation. In our paper, the loss networks mainly denote the WDM network. Of course, it also can be the circuit-switched networks. The main difference of the WDM networks and circuit-switched networks is that in the circuit-switched networks, channels on

a link are indistinguishable, while the wavelengths on a link are distinct. It is well known that product form solution is the most excellent outcome of the service network, and it also is the common characteristic of many networks. In this chapter, we give the equilibrium analysis for requests which have the routing section in WDM loss networks. The results have the product form.

In the fifth chapter, we compute the blocking probability for WDM loss networks which have the routing section. Firstly we introduce the existing investigation methods and famous models for studying the blocking probabilities in the circuit-switched network and WDM networks. Then we give the method to compute the blocking probabilities for WDM loss networks which have the routing section.

In the sixth chapter, we summarize the paper and put forward the expectation for the future investigation.

Key words Markovian process, Equilibrium Distribution, Blocking Probabilities, Loss Networks, WDM Networks, Route, Wavelength, Anycast

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 WDM 的现状和发展	1
§ 1.2 WDM 全光网的引入	4
§ 1.3 选题依据	9
§ 1.4 拟研究的主要方向	12
§ 1.5 论文的主要工作	13
第二章 WDM 光纤网络中任播形式请求的路由和 波长分配算法	15
§ 2.1 WDM 光纤网络结构	15
§ 2.2 波长路由 WDM 网络中的研究问题	18
§ 2.3 WDM 全光网拓扑结构	21
§ 2.4 波长分配/路由算法	23
§ 2.5 任播介绍	30
§ 2.6 WDM 网络中静态任播流的路由和波长分配	32
§ 2.6.1 网络模型	32
§ 2.6.2 ARWA 问题	33
§ 2.6.3 路径选择方法	33
§ 2.6.4 我们的算法	35
§ 2.6.5 模拟结果和分析	36
§ 2.7 WDM 网络中动态任播流的路由和波长分配	40
§ 2.7.1 网络模型和算法	40
§ 2.7.2 模拟结果和分析	42

第三章 马氏过程若干知识	45
§ 3.1 马氏过程	45
§ 3.2 马氏过程的可逆性	52
§ 3.3 马氏过程中的 Kolmogorov 准则	56
第四章 WDM 丢失网络平衡分析	59
§ 4.1 关于 WDM 丢失网络	59
§ 4.2 乘积形式解	61
§ 4.3 WDM 丢失网络平衡性分析	66
§ 4.4 WDM 丢失网络中任播请求平衡性分析	70
第五章 WDM 丢失网络阻塞概率的计算	73
§ 5.1 阻塞概率	73
§ 5.2 研究模型	75
§ 5.3 生灭过程	84
§ 5.4 WDM 丢失网络中任播请求阻塞率的计算	87
第六章 总结以及今后工作	93
§ 6.1 总结	93
§ 6.2 未来工作展望	94
参考文献	96
攻读博士学位期间公开发表及完成的论文	106
致谢	108

第一章 绪 论

本章主要介绍了我们的研究背景, WDM 的现状和发展, 引入 WDM 全光网的原因, 选题依据和拟研究的主要方向, 最后列出了本文的研究内容和安排。

§ 1.1 WDM 的现状和发展

“千里眼, 顺风耳”是古代人们在神话故事中的憧憬和向往。“秀才不出门, 能知天下事”是人们长期以来的一种美好愿望, 在信息技术高速发展的今天, 都已经变成了现实。

在信息社会里, 人类社会对信息的需求正爆炸式地增长, 尤其是因特网的迅猛发展以及万维网(WWW: World Wide Web)、视频点播(VOD: Video on demand)、网络游戏以及各种新业务如网上购物、网络电话、高清晰电视(HDTV: High-definition Television)等的出现, 使带宽的需求成指数形式增长^[1]。近几年来, 传统的语音业务的增长率只有 5%~10%, 而以 Internet 为代表的业务的增长率为 20%~30%。数据通信业务量如此迅速, 持续增长的最直接的动力就是来自 Internet 业务量持续指数级的增长。主要的 Internet 提供商给出的数据表明: 系统带宽正以超摩尔的速率增长, 带宽大约每 6—9 个月就需要翻一番, 比著名的 CPU 性能进展的摩尔定律(约 18 个月翻一番)还要快 2—3 倍。全球通信业务的迅速增长, 出现了所谓的“光纤耗尽”现象和对代表通信容量的带宽的“无限渴求”现象。为提高通信系统的性价比和经济的有效性, 满足不断增长的电信和 Internet 业务需求, 如何提高通信系统的带宽已经成为焦点。通信业务的爆炸式增长和对未来的理想通信形式的渴望, 迫使人们不断提

高网络的传输速度和交换容量。因此提高骨干网的传输速率,增大传输容量是光通信发展的大方向之一。提高传输速率的方式有很多种,如:电时分复用(ETDM: Electrical Time Division Multiplexing),波分复用(WDM: Wavelength Division Multiplexing),光时分复用(OTDM: Optical Time Division Multiplexing),光码分复用(OCDM: Optical Code Division Multiplexing)和分复用(SDM: Space Division Multiplexing)等。当前,最切合实际,发展最快的是波分复用(WDM),尤其是在光纤资源较为紧张的情况下,人们往往把 WDM 作为目前系统升级扩容的首选方案^[33, 34, 48],这是由于 WDM 技术能用相对简单的技术形式充分挖掘光纤的可用带宽,且成本比较低廉,因而得到了迅猛的发展。

WDM 技术的发生与发展是和光纤技术、光纤通信系统的发生与发展紧密相关的。光纤通信的诞生成为通信史上的一次重要革命,它极大地提高了传输带宽。1966 年,英籍华裔学者高锟(C. K. Kao)和霍克哈姆(C. A. Hockham)发表了关于传输介质新概念的论文,指出了利用光纤(optical fiber)进行信息传输的可能性和技术途径,奠定了现代光通信-光纤通信的基础。1970 年,光纤研制取得了重大突破,在当年,美国康宁(Corning)公司第一次宣布它所研制的高纯度硅酸盐玻璃单膜光纤的损耗小于 20 db/km,从而打开了光纤通信走向实用化的大门,使光纤通信迅速发展起来。

在整个光纤通信的发展过程中,可将光纤通信的发展大致归纳为三个阶段^[57]:

第一阶段(1966—1976 年)这是从基础研究到商业应用的开发时期,在这个时期,实现了短波段(0.85 μm)低速率(45 或 35 Mb/s)多模光纤通信系统,无中继传输距离为 10 km。

第二阶段(1976—1986 年)这是以提高传输速率和增加传输距离为研究目标和大力推广应用的大发展时期。在这个时期,光纤从多模发展到单模,工作波长从短波长(0.85 μm)发展到长波长(1.31 μm 到

1.55 μm)实现了工作波长为 1.31 μm 传输速率为 140~565 Mb/s 的单模光纤通信系统,无中继传输速率为 100~150 km。

第三阶段(1986—1996 年)这是以超大容量超长距离为目标全面开展新技术研究的时期,在这个时期,实现了 1.55 μm 色散移位单模光纤通信系统。利用外调制技术,传输速率可达 2.5~10 Gb/s,无中继传输距离可达 150~100 km,实验室可以达到更高水平。

简单来说,波分复用是光纤通信中的一种传输技术,它利用了一根光纤可以同时传输多个不同波长的光载波的特点,把光纤可能同时应用的波长范围划分为若干个波段,每个波段用作一个独立的通道传输一种预定波长的光信号。其基本原理是在发送端将不同波长的光信号组合(复用)起来,在接受端又将组合的光信号分开(解复用)并传输到不同的终端。通常将波分复用缩写为 WDM。光波分复用的实质是在一根光纤上进行光频分复用,只是因为光波通常采用波长而不用频率来描述,监测与控制。在波分复用技术高速发展,以及每个光载波占用的频段极宽,光源发光频率及其精确的前提下,或许使用光频分复用(OFDM)来描述更恰当些。

这里可以将一根光纤看作是一个“多车道”的公用道路,传统的 ETDM 系统只不过是利用了这条道路上的一条车道,提高比特率相当于在该车道上加快行驶速度来增加单位时间内的传输量。而利用 WDM 技术类似于利用公用道路上尚未使用的车道,以获取光纤中未开发的巨大传输能力^[16]。采用 WDM 技术来扩容是当前唯一实现的超大容量传输技术,它不仅可以节约大量光纤而迅速扩容,而且还可以节约大量再生中继器以降低整个系统的成本,奠定了未来全光网络的基础。

按信号的复用方式对光纤通信系统进行分类,光纤通信系统可以分为光频分复用(OFDM)系统,电时分复用(ETDM)系统,光时分复用(OTDM)系统,波分复用(WDM)系统,光码分复用(OCDM)和空分复用(SDM)系统^[48]。在本文中,我们将主要研究 WDM 系统,WDM 系统的基本构成主要有两种形式:双纤单向传输和单纤双向

传输^[48]。单向 WDM 是指所有的光通路同时在一根光纤上沿同一方向传送,在发送端将载有各种信息的、具有不同波长的光信号通过光复用器组合在一起,并在一根光纤中单向传输。由于各信号是通过不同光波长携带的,所以彼此之间不会混淆,在接受端通过光解复用器将不同波长的信号分开,完成多路光信号传输的任务,反方向通过另一根光纤传输,原理相同;双向 WDM 是指光通路在一根光纤上同时向两个不同的方向传输,所用波长相互分开。

概括来说, WDM 系统的主要特点为:

(1) 充分利用光纤的低损耗波段,大大增加光纤的传输容量,降低成本。

(2) 对各信道传输的速率、格式等具有透明性,有利于数字信号和模拟信号的兼容。使用不同的波长,快或慢的异步和同步数字数据及模拟信息,可以在一根光纤上同时独立发送,而不需要一致的信号结构。

(3) 可提供波长选路,使用多个波长来增加链路的容量和灵活性,使建立透明的、具有高度灵活性的 WDM 全光通信网成为可能。

(4) 可节省光纤和光中继器,便于对已建成系统进行扩容。

WDM 具有广阔的发展前景,特别是对于我国这样一个幅员辽阔,具有庞大干线网的国家。1996 年全球 WDM 设备市场约为 11 亿美元,到 2000 年超过 15 亿美元,预计到 2005 年将猛增到 125 亿美元。2001—2006 年是 WDM 技术迅猛发展的时期,运营公司将大量采用 WDM 光网络技术作为宽带网络的基础结构,基于波长选路及波长变换的光网络将大量应用,以保证网络的快速恢复及高可靠性^[48]。

§ 1.2 WDM 全光网的引入

随着光分插复用器(OADM)和光交叉连接设备(OXC)的出现,使得 WDM 技术从最初的点到点传输技术逐渐转变为一种网络技术^[62], WDM 宽带光联网已经成为继 SDH 电联网后的又一次新的光

通信发展高潮。从当前信息技术发展的潮流来看,建设高速大容量的宽带综合业务数字网(B-ISDN)已经成为现代信息技术发展的必然趋势。而波分复用技术(WDM)的实现化,可使光纤的传输容量极大地提高,为高速大容量的宽带综合业务网的传输提供了有效的途径。

20 世纪 70 年代,美国未来学家托夫勒在《第三次浪潮》中首次描述了信息社会的美好前景,揭开了信息时代的序幕。在人类信步迈向新世纪的同时,以信息经济和知识经济为核心的“新经济”成为世界经济发展的最主要的增长点。因此,具有极丰富带宽资源和优越性能的多波长性能的多波长光通信网络因其在国家信息架构中的基础地位而备受关注^[33]。

人们设想在不久的将来可拥有一个更为理想的通信环境,即在任何时间,任何地点,可以使用非常便宜且安全的通信方式进行互相联系与交流。这个目标支持并推动着现代通信网络技术的不断演进和持续发展。此外,诸如可视图文,远程教育,远程医疗,电视购物,电视会议,高清晰电视(HDTV),交互式有线电视等数字或模拟图像通信新业务的出现,提出了进一步实现网络高速化和宽带化的迫切要求。高宽带网络逐步展示出它在信息技术中的核心地位。

自 90 年代初以来,人类社会进入了一个前所未有的信息爆炸时代,其中最具影响的三大事件是:伴随着个人电脑普及而来的 Internet 的飞速发展,由数字移动通信业务导向个人通信而引发的常规通信的革命,以及多媒体通信业务的出现。信息爆炸刺激了全球通信业务的疯狂增长,而这种疯狂增长的最直接的后果就是出现了所谓的“光纤耗尽”现象——埋下去的光纤都用光了。以美国为例,从 1994 年起,几个主要的长途电信业务承载商的光纤通信系统都持续出现了负荷能力接近饱和的问题^[91, 48]。

就建设资金而言,光纤通信系统的初期投资是非常大的,主要原因是光缆线路的敷设费用很高,那么如何利用现有光缆系统实现最大限度的扩容呢?传统的扩容方法是采用 TDM(时分复用)方式,即对电

信号进行时间分隔复用。无论是 PDH 的 34 Mbit/s、140 Mbit/s、565 Mbit/s 还是 SDH 的 155 Mbit/s、622 Mbit/s、2 488 Mbit/s、9 952 Mbit/s 都是按照这一原则进行的。据统计,当系统速率不高于 2 488 Mbit/s 时,系统每升级一次,每比特的传输成本下降 30% 左右。因此,在过去的系统升级中,人们首先想到的并采用的是 TDM 技术。采用这种时分复用方式固然是数字通信提高传输效率,降低传输成本的有效措施,但是随着现代通信网对传输容量要求的急剧提高,利用 TDM 方式已日益接近硅和砷化镓技术的极限,并且传输设备的价格越高,允许色散色度和极化模色散的影响也日益加重,因此人们正越来越多地把兴趣从电时分复用转移到光复用,即从光域上用波分复用方式来提高传输效率,提高复用速度。其突出特点是:能在一根光纤中同时传输不同波长的几个甚至上百个光载波信号,不仅能充分利用光纤的带宽资源,增加系统的传输容量,而且能提高系统的经济效益。从世界范围来看,目前正在建设或将要建设的商用光纤通信系统,基本上都是 WDM 光纤通信系统,原有的光纤通信系统也将陆续改造成 WDM 系统^[48]。

90 年代初,国际上对光子交换的研究集中在 ATM 和分组交换上,采用高速光开关,在时域实现光子交换。但这种光交换并没有迅速发展起来,因为目前光存储器件尚不成熟,不能在光上识别 ATM 信头。国内外通用的方法是用光分路器将光信号分下一小部分,将其转换为电信号,在电上识别信头,再控制光开关动作,这样就失去了光上的透明性,也突破不了电子瓶颈对速率的限制。

90 年代中期以后, WDM 光纤传输系统的应用前景已经很明朗,我国已开始引进 WDM 系统,国际上也已开始进行 WDM 光网络的实验研究,在点对电 WDM 系统的基础上,以波长路由为基础,引入光交叉连结(OXC)和分插复用(OADM)节点,建立具有高度灵活性和生存性的光网络,被认为是可行的且有发展前途的方案。WDM 全光网络具有如下特点^[33]:

(1) 可以极大地提高光纤的传输容量和节点的吞吐容量,适应未

来高速宽带通信网的要求。全光网可以与现有的通信网络兼容,由于全光网是基于 WDM 传输以及波长路由方式的光通信网,它可以比较容易与现有的通信网络兼容,并且支持未来的综合业务数字网以及网络的低成本升级。

(2) OXC 和 OADM 对信号的速率和格式透明,可以建立一个支持多种电通信格式的,透明的光传送平台。在全光网络中,高比特的用户信息在中间节点处不需要经过光/电和电/光转换以及电子处理,这就克服了“电子瓶颈”问题,不仅可以大大提高容量,而且使网络可以支持各种标准的业务,这是因为如果在某个波长上建立了连接,那么任意格式和速率的信号都可以在两个节点之间传送,与其他连接上传送的内容没有关系。

(3) 以波长路由为基础,可以实现网络的动态重构和故障的自动恢复,构成具有高度灵活性和生存性的光传送网。在网络控制管理系统的调度下,全光网可以根据不同的情况(如统计规律、突发性业务、网络局部节点坏损、光纤连接中断等)通信业务的变化,动态的改变网络的结构以满足实际通信网的要求,充分利用网络资源,减少网络闲置的现象,提高网络的可靠性。

(4) 全光网还具备可扩性(scalable),即在新的节点加入时,不影响原有的网络结构和原有各节点的设备,世界许多国家在现有的通信网络系统中已投入大量的人力、物力和财力,原有的电通信系统也具有庞大的基础。在网络的扩建时可以对原有的通信网络做尽量少的改动,降低网络维护成本。

全光网已经被 ITU-T 定义为光传送网。“全光网络”是光纤通信发展技术的最高阶段,也是理想阶段。实现透明的、具有高度生存性的全光通信网是宽带通信网未来的发展目标。

WDM 全光网由于具有可重构性,可扩展性,透明性,兼容性,完整性和生存性等特点,因此一经问世,就引起了人们的极大的兴趣,各国投入大量的人力、物力进行研究和现场实验,ITU-T 也抓紧研究有关光网络的建议,WDM 全光网络被认为是通信网向宽带,大容