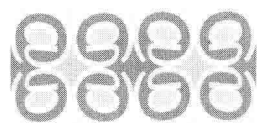


宽带网络技术

李鉴增 金立标 苗方 编著

网络工程专业「十二五」规划教材

中国传媒大学出版社



网络工程专业“十二五”规划教材

宽带网络技术

李鉴增 金立标 苗 方 编著

刘剑波 主审



中国传媒大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

宽带网络技术 / 李鉴增, 金立标, 苗方编著. —北京: 中国传媒大学出版社, 2015.9

(网络工程专业“十二五”规划教材)
ISBN 978-7-5657-1406-1

I . ①宽… II . ①李… III . ①宽带通信系统—计算机通信网—高等学校—教材
IV . ① TN915.142

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 160899 号

宽带网络技术

编 著	李鉴增 金立标 苗 方
主 审	刘剑波
责 任 编 辑	蔡开松
装帧设计指导	吴学夫 杨 蕾 郭开鹤 吴 颖
设 计 总 监	杨 蕾
装 帧 设 计	刘鑫、方雪悦等平面设计创作团队
责 任 印 制	阳金洲
出 版 人	王巧林
出 版 发 行	中国传媒大学出版社
社 址	北京市朝阳区定福庄东街 1 号 邮编: 100024
电 话	86-10-65450528 65450532 传真: 65779405
网 址	http://www.cucp.com.cn
经 销	全国新华书店
印 刷	北京易丰印捷科技股份有限公司
开 本	787mm × 1092mm 1/16
印 张	18
版 次	2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5657-1406-1/TN · 1406 定 价 56.00 元
版权所有	翻印必究 印装错误 负责调换

再版前言

2003年1月,本书第一版由中国广播电视出版社出版。2006年,该书被评为北京市精品教材。

10年来,无论是有线电视网络技术,还是其他宽带网络技术,都有了长足的发展。截止到2013年6月底,我国已有网民5.91亿,但上网速率普遍不高,不能满足国民经济发展和人民群众文化生活的需要。2013年8月1日,国务院下发了《“宽带中国”战略及实施方案》,“作为抢占新时期国际经济、科技和产业竞争制高点的重要举措”,再次强调要“推动电信网、广播电视网和互联网融合发展”,明确提出了“宽带中国”的目标:到2015年,初步建成适应经济社会发展需要的下一代国家信息基础设施,城市和农村家庭宽带接入能力基本达到20Mbps和4Mbps,部分发达城市达到100Mbps;到2020年,基本建成覆盖城乡、服务便捷、高速畅通、技术先进的宽带网络基础设施,城市和农村家庭宽带接入能力分别达到50Mbps和12Mbps,50%的城市家庭用户达到100Mbps,发达城市部分家庭用户可达1Gbps。《“宽带中国”战略及实施方案》还对接入网、城域网和骨干网建设,对应用基础设施建设和在经济建设等各方面的应用提出了具体的要求。

为了实现国务院提出的战略目标,迫切需要培养大批技术人才及其相应的教材。按照中国传媒大学十二五规划教材的要求,我们对本书进行了修订和补充,以适应宽带中国战略实施的要求。本书第二版除保留第一版的优点以外,主要对内容作了更新:计算机网络单独成章,补充了一些新的内容;增加了光传送网、软交换、光交换、无线网络、宽带接入等新技术。此外,为了适应90后学生的特点,第二版在形式上也做了一些改进,增加了各章小结、重点内容、延伸阅读,并出版了与之配套的光盘,提供了我国广电系统在宽带网络和有线电视系统方面的一些具体案例。

本书第二版修订时,金立标负责撰写第六、七两章,并整理全书的参考文献、延伸阅读和案例介绍;苗方负责撰写第二章,李鉴增负责其余各章,并统稿全书,刘剑波教授则负责主审。

在本书第二版出版之际,作者要感谢中国传媒大学校领导、教务处领导和信息工程学院领导对本书编写的资助和大力支持,感谢中国传媒大学出版社对本书出版的大力支持。

作者

2015年6月于

中国传媒大学信息工程学院

第一版前言

21 世纪将是信息化、数字化和网络化的世纪。广播电视技术、通信技术、计算机技术和网络技术和相互渗透,已经并将继续对人们的生活、工作、休闲、娱乐和其他各方面产生深远的影响,发挥巨大的作用。

20 世纪 90 年代以来,我国的有线电视技术得到了长足的发展。有线电视系统从一开始时的两三个频道,发展到具有几十个模拟频道和数百个数字频道;从只有几十用户的小系统,发展到包括几百万用户的大网络;传输距离从一两幢楼发展到几十、甚至几百公里;从单纯的电缆传输发展到集光缆、微波、电缆于一体的综合大系统;从单向传输发展到双向传输;从单一的分配电视节目发展到具有多种功能,可以交互式传输多种信息,提供多种服务的综合信息网。目前,全国广播电视光纤干线网已连通了除西藏以外的境内各省、市、自治区,绝大多数省、市也把光纤干线铺到了县、市,甚至乡、镇、村一级,许多省、市有线电视台积极开展扩展业务和增值业务,取得了明显的社会效益和经济效益。

我国的有线电视光纤网是一个带宽很宽的综合信息网,在网络的建设和维护中,引入了大量的数字技术、通信技术和计算机技术。这些技术是有线电视网工程技术人员原来所不熟悉的,他们迫切要求进行继续教育和岗位培训,进一步学习新技术、新知识。相信本书的出版可以部分满足他们的要求。

本书主要介绍宽带网络的一些新技术,全书共分 9 章。考虑到广播电视技术人员对通信和网络技术不太熟悉,我们在第 1 章简要介绍了通信网的一些基本知识,包括计算机网络、X.25 分组网、帧中继(FR)、数字数据网、综合业务数字网、ADSL、电力线通信技术和无线家庭网络等。从第 2 章开始,我们主要介绍了 SDH 技术、ATM 技术、千兆以太网和其他宽带 IP 技术。

本书前 7 章由李鉴增编写,第 8 章由李川编写,第 9 章由包红刚编写,李鉴增负责全书的统稿。

本书可作为高等学校相关专业的硕士生和高年级本科生的教材,也可供广播电视、通信、信息行业的技术人员进行继续教育和岗位培训时参考。尽管本书在编写过程中力图科学、全面、系统、完整、深入浅出地介绍先进、实用的宽带网络技术,为读者提供一本简明扼要、内容充实的书籍,但由于时间仓促,作者的水平有限,难免出现一些疏漏甚至错误,敬请读者和专家学者批评指正。

在本书正式出版之际,作者要感谢广播电影电视总局教育专项补助金和北京市教委对编写本书的资助,感谢中国广播电视出版社领导和王本玉编辑对本书出版的支持,感谢李栋教授主审时对本书的批评和建议。张宜春、金立标两同志阅读了本书的初稿,提出了许多宝贵的意见,并绘制了本书部分草图,一并表示感谢。

作者

2002 年 12 月

致力专业核心教材建设 提升学科与学校影响力

中国传媒大学出版社陆续推出

我校 15 个专业“十二五”规划教材约 160 种

播音与主持艺术专业（10 种）

广播电视编导专业（电视编辑方向）（11 种）

广播电视编导专业（文艺编导方向）（10 种）

广播电视新闻专业（11 种）

广播电视工程专业（9 种）

广告学专业（12 种）

摄影专业（11 种）

录音艺术专业（12 种）

动画专业（10 种）

数字媒体艺术专业（12 种）

数字游戏设计专业（10 种）

网络与新媒体专业（12 种）

网络工程专业（11 种）

信息安全专业（10 种）

文化产业管理专业（10 种）



传媒人书店
(For iOS)



传媒人书店
(For Android)



微博关注我们



微信关注我们



访问我们的主页

本书更多相关资源可从中国传媒大学出版社网站下载

网址：<http://www.cucp.com.cn>

责任编辑：蔡开松

意见反馈及投稿邮箱：1091104926@qq.com

联系电话：010-65783654

目 录

第 1 章 网络技术概论 / 1

- 1.1 信息网络 / 1
- 1.2 多路复用技术 / 7
- 1.3 交换技术 / 10
- 1.4 路由器与路由算法 / 13
- 1.5 宽带业务的分类和要求 / 21
- 1.6 宽带中国战略 / 23
- 1.7 本章小结 / 26
- 习 题 / 27

第 2 章 计算机网络基础 / 28

- 2.1 计算机网络概述 / 28
- 2.2 计算机网络体系结构 / 37
- 2.3 局域网技术 / 48
- 2.4 广域网技术 / 62
- 2.5 Internet / 72
- 2.6 本章小结 / 89
- 延伸阅读 / 90
- 习 题 / 90

第 3 章 SDH 技术 / 91

- 3.1 SDH 网概述 / 91
- 3.2 SDH 的一些基本概念 / 92
- 3.3 SDH 的复用 / 96
- 3.4 SDH 网的基本网元 / 102
- 3.5 SDH 的误码及相位特性 / 106

3.6 SDH 的接口参数 / 120

3.7 SDH 自愈网 / 123

3.8 SDH 网的同步 / 127

3.9 本章小结 / 130

延伸阅读 / 130

习 题 / 131

第 4 章 异步转移模式 (ATM) / 132

4.1 ATM 的基本原理 / 132

4.2 ATM 的分层结构 / 137

4.3 ATM 的服务质量 / 138

4.4 ATM 交换技术 / 143

4.5 不同排队方法的数学分析 / 150

4.6 本章小结 / 158

习 题 / 158

第 5 章 宽带 IP 技术 / 159

5.1 宽带 IP 的基本知识 / 159

5.2 高速以太网 / 161

5.3 IP Over ATM / 168

5.4 IP over SDH / 173

5.5 IP over Optical / 178

5.6 IP over DWDM / 179

5.7 弹性分组环技术 / 182

5.8 光传送网 / 187

5.9 软交换 / 191

5.10 光交换 / 195

5.11 本章小结 / 201

延伸阅读 / 201

习 题 / 202

第 6 章 无线网络技术 / 203

6.1 无线网络的发展 / 203

6.2 无线局域网 / 204

6.3 无线城域网 / 213

6.4 无线广域网 / 217

6.5 无线个域网 / 226

6.6 本章小结 / 234

延伸阅读 / 234

习 题 / 234

第 7 章 宽带接入技术 / 235

7.1 ADSL 接入技术 / 235

7.2 HFC 接入技术 / 240

7.3 光纤接入技术 / 248

7.4 电力线接入技术 / 268

7.5 本章小结 / 272

延伸阅读 / 273

习 题 / 273

参考文献 / 275

第1章 网络技术概论

1.1 信息网络

在当今的信息社会里，除了各种自然资源和生产工具以外，信息也作为一种重要的资源和财富，在社会的发展过程中起着越来越重要的作用。国家与国家之间，企业与企业之间，公司与公司之间，人与人之间的竞争，在很大程度上取决于对信息的掌握。人们迫切希望能尽快地掌握尽量多的信息，迫切要求一种能够同时传输多种信息的多媒体网络，这就是宽带信息网络。

在具体讲解宽带信息网络主要的技术之前，先简要介绍一些信息网络的基本知识。

1.1.1 信息网络的基本概念

我们知道，传输话音的电话网、传输计算机数据的计算机网、传输广播电视节目的有线广播电视网和传输各种图像、话音和数据的综合信息网，都是在分处异地的用户之间传递信息的系统，都属于信息网络的范畴。

信息网络通常是由终端设备、传输设备和交换设备组成。

终端设备如计算机、传真机、广播电视接收机、电话机等，是用来发送和接收用户信息的设备。传输设备为用户信息和网络管理信息提供传输路径，它通常由介质（如无线空间、双绞线、同轴电缆、光纤等）和对信号（包括用户信息和网络管理信息）进行放大、处理的光电设备组成。交换设备在干线传输网络中又称为节点，其任务是把不同地点的传输设备互联起来，为信息选择合适的传输路径（这种传输路径常称为路由），常包括交换机与路由器。

信息网络的分类方法很多。按照传输的内容（话音、广播电视信号和计算机数据）可分为电信网、广播电视网和计算机网；按照信息网络的分布范围可分为农村网、市内网、长途网和国际网；按照信息网络的服务对象则可分为公用网、专用网或军用网；按照传输介质可分为有线网和无线网；按照传输信号的类型可分为模拟网和数字网；按照终端是否可自由移动可分为固定网和移动网，等等。

1.1.2 现代信息网络的发展趋势

现代信息网络正在向数字化、宽带化、综合化、智能化、个人化、开放性和标准化发展。

数字化是各种信息都采用数字形式传输、交换和处理,并采用数字式的终端设备,与模拟通信相比具有很多突出的优点。

宽带化又称为高速化,即在数字传输系统中可以传输很高的速率。在一根光纤中利用一个波长传输的数字信号速率已达到 $10 \sim 40\text{Gb/s}$,利用 ATM 交换机的交换速率也达到 $155 \sim 2488\text{Mb/s}$ 。

综合化是在同一个网络中可以传输不同类型、不同速率的业务,例如话音、图像和数据等,组成“全业务网”。

智能化是利用计算机的智能,为用户提供更多、更新的自动业务。例如程控电话中的 400、800、呼叫转移、自动回叫、虚拟专用网,以及收费、维护等方面的自动化网络管理等,都属于智能业务。随着技术的不断进步,网络的智能化程度将越来越高,也将更好地为用户提供服务。

个人化又称为移动化,即用户个人在任何地方都可以自由通信。它包括终端移动性和个人移动性。移动通信网中的手机就具有可在全球移动的终端移动性;个人移动性则不需要任何特定的终端,例如电子邮件,利用密码和软件即可通过任意的计算机在全球的任何地方通过互联网来接收。

开放性和标准化是指不同厂家生产的所有信息网络设备和终端都有统一的接口,符合统一的标准,具有很好的横向兼容性,便于进一步提高性能,降低成本,也使用户可以自由选择不同厂家的产品,满足自己在不同时期的不同需要。

1.1.3 网络的拓扑形式

所谓网络的拓扑,是指由网络节点和传输线路排列而成,在物理上构成实际网络的几何形状。信息网络的拓扑形式主要有以下几种。

1. 星形网络:在星形网络中有一个特殊的中心站(例如有线电视网的前端,电话网的中心局等),其他站都同它直接相连,其他站之间的通信要通过中心站来进行。星形网络的优点是结构简单,排除故障方便,建网和再配置容易;信息的平均时延量小。缺点是所需线路较长,安装稍微困难,成本也较高;中心站的通信速率会形成整个网络的瓶颈,特别是中心站出现故障后,会造成整个网络的瘫痪。电话网、有线电视用户光纤网一般采用这种形式。

2. 树形网络:从一个中心站出发,经过若干逐渐分叉的支路,同用户终端相连。其优点是一条线路可连接若干节点,线路比较节省。它也有与星形网络相同的缺点,即如果中心站出现故障,也会造成整个网络的瘫痪。

3. 环形(Ring)网络:各节点间构成环形,信息在环中沿固定的路径运行。其优点是传输速率高,故障容易排除。如果通过沿相反方向传送的两条线路把各个站点联

系起来组成双环形网络,则具有很高的排除故障的自愈能力。但这种网络的灵活性较差,安装和再配置较困难。要求可靠性很高的有线电视网、数据传输网等一般采用这种网络。

4. 网状网络:这种网络中各节点都是平权的,各节点之间都有线路直接相连,没有主次之分。这种网络的可靠性很高,易排除故障和隔离故障点,但结构复杂,线路浪费,再配置较困难。一般用于要求较高的主干网。

5. 总线形网络:这是一种分散控制型网络,所有节点都挂在同一条总线(Bus)上,其优点是结构简单,安装方便,所需线路较少;缺点是排除故障和再配置都比较困难,可靠性差,线路故障会造成网络瘫痪。

6. 蜂窝状网络:这是一种无线连接的网络,移动通信一般采用这种方式。它是将整个区域划分为若干个单元,每个单元内部的设备与中心站进行通信,中心站之间再互联,组成一个网络。这种网络安装和再配置比较容易,故障排除和隔离简单,但中心站的故障会使该区域的设备全部瘫痪。

1.1.4 干线传输网和用户网

信息网络都是由干线传输网和用户网组成。干线传输网包括传输设备和网络节点;用户网是直接为用户提供服务的网络,在电信部门一般把它称为接入网。

干线传输网一般分为国家干线网,省市干线网,地市干线网和本地干线网等。在有线电视传输网中,国家和省、市长途干线骨干网一般采用数字光纤干线,距离较短的本地干线网则可采用数字或(和)模拟光纤干线。

为了提高网络的可靠性,国家干线网和省市干线网应采用环形或网状结构,有多种保护方案;地市干线网和县级干线网则一般采用环形或星形结构。

有线电视用户网一般采用混合光纤同轴网(HFC)结构。从小系统的前端(或大系统的最后一个分配中心)到光节点一般采用光纤组成星形(或环形)结构,在光节点以下利用同轴电缆组成树形结构。

1.1.5 对信息网络的基本要求

建设一个优良的信息网络,至少需要满足可靠性、可扩容性、灵活性、易管理性、经济性等基本要求。

所谓可靠性,是说网络的性能非常可靠,不仅误码率低,而且不能因为网络出现故障而使业务中断或受到影响。误码率通常通过网络的正确设计和设备本身的高性能来保证;而要保证网络不致中断,则是通过设备本身的可靠性、重要或易损设备的备份,以及自愈网的建立等来实现。

可扩容性是指在业务不断增多时,网络自身和网管系统都能够在不停机的情况下进行在线扩容。

灵活性是指网络仅通过软件的修改和配置即可为不同的用户提供不同类型的服务。特别是在对市场和用户的需求不是很清楚时,建设一个灵活的网络尤为重要。如果能选用业务适配能力强的设备,建立一个适用于不同业务的统一平台,即可实现利用尽

量少的设备来提供尽可能多的服务。

易管理性是指在网络建设好以后,在正常营运时便于进行管理。据统计,在一个网络的全寿命成本中,初期的设备投资仅占40%,而使用过程中的维护和管理费用要占60%。易于管理,不仅能向用户提供优质服务,而且能够降低管理成本。为了便于管理,需要进行正确的设计,把各种不同的服务放在一个统一的管理平台上,建设一个统一的网管系统,以减轻网络管理的复杂性,降低成本,提高网络的运行效率。用户管理是对用户的基本情况、权限等级、业务使用和交费情况进行管理。

经济性是指在建设一个网络时,应在保证质量的前提下,尽可能地降低成本,在运行时尽可能地提高网络的利用率,以取得更高的经济效益。

1.1.6 描述信息网络的技术指标

为了保证传输网络具有一定的服务质量,需要用一些参数来描述网络的性能,如误码率、分组错误率、时延、抖动和漂移等。

1. 描述语义透明性的指标

如果一个网络在传输信息时不发生错误,说明该网络在传输信息时具有语义透明性。但在传输中绝对不出现错误是不可能的,只能要求其尽量满足语义透明性的要求。描述语义透明性的参数有:

误码率(BER)指在单位时间内发生的错误比特数和总比特数之比。单个错误一般是由噪声或系统缺陷引起,突发错误则是由于外界干扰的脉冲噪声所产生。误码率的测试应持续较长的时间,才能得出较准确的结果。在一个光纤数字传输系统中,常用长期平均误码率,误码时间比和误码秒比来描述其误码率。长期平均误码率是在较长时期内测出系统的平均误码率,它不能反映出随机、突发的误码对系统性能的影响。若把较长的时间分割成较短的时间间隔 T_0 ,观测每一个 T_0 的平均误码率,计算平均误码率超过某一门限值的时间与总的测量时间之比,就是误码时间比。这个指标比较适用于短时间内可能出现大量误码的光纤传输系统。误码秒比是以秒为测量单位,只要在一秒钟内出现误码,不管有多少误码,都称为一个误码秒ES;如果在一秒内的误码率大于 10^{-3} 以上,则称为严重误码秒SES。在测试时间内,累积的误码秒与总的可用时间(以秒为单位)之比称为误码秒比ESR。不同业务对误码率的要求不同。话音通信要求误码率低于 10^{-3} 即可,数据通信则要求误码率在 10^{-8} 以下。

分组错误率(PER)指在一段时间内发生的错误分组和总分组数之比。造成分组错误有两种情况,一是因网络堵塞而丢失,一是因寻址错误而错投。后者的错误又会产生两个后果。例如应该传送给用户A的分组错投给用户B了,对于A来说,分组被丢失了;对于B来说,则插入了错误的分组。因此分组错误率又可分为分组丢失率(PLR)和分组误插率(PIR)。分组丢失率是在一段时间之内丢失的分组和总分组数之比。分组误插率是在一段时间之内误插的分组和总分组数之比。

在传输系统中可能出现的错误,多数是由于系统缺陷和噪声造成的单比特错误,

也有由于维护动作和外界干扰造成的突发性错误。在交换和复用设备中,还可能出现由于分组头错误或由于拥塞引起的分组差错(丢失和误插)。

为了改善网络的语义透明性,可以采用前向纠错 FEC 或自动请求重发 ARQ 等方法。采用不同编码技术的 FEC 可以只是检错、只是纠错或同时检错和纠错。采用 ARQ 技术需要重传那些丢失的或已经发出但未得到证实的分组,因而会增加业务流量,降低网络的效率。

在一个数字通信系统中,误码的产生主要来自以下三个方面。

(1) 传输错误引起的分组丢失和误插

传输错误引起的误码,主要有噪声和系统缺陷引起的单比特差错以及人为维护、处理和脉冲噪声引起的突发差错。其中人为维护时,经常有线路保护性的切换动作,导致短暂的线路中断,可能会有 10% 的误码秒包含 100 个以上的错误。如果传输错误引起了分组头错误,则会出现分组的丢失和误插,导致错误倍增。因此需要对分组头进行必要的差错控制。

(2) 交换系统中分组头识别错误引起的分组丢失和误插

在交换系统中,由于硬件或软件出错,会造成分组头识别的错误和错误的路由选择,使分组沿错误的路径传输,也会造成丢失和误插。由于现在交换机设计使其硬件和软件的容错能力大大提高,这种原因造成的分组丢失率和误插率都很小,可以不必单独考虑。

(3) 交换系统或复用系统中缓存器溢出引起的分组丢失

在交换系统和复用系统中,有许多缓存器,供分组排队使用。缓存器容量太大,会加大系统的成本;缓存器容量太小,则会造成缓存器的溢出,出现分组的丢失。这个原因引起的分组丢失常常是导致数字通信网络出现误码的主要因素,所以,必须认真对待,认真设计交换机和复用器中缓冲队列大小和缓冲策略。

2. 描述时间透明性的指标

时间透明性是指信息传输的时间很短,不改变各部分信息之间的时间关系。描述时间透明性的参数有:

时延: 发送端发送信息和接收端收到信息的时间之差称为时延。对于实时信息网络,时延使通信双方失去亲切感。对于非实时传输的数据业务,时延对信息的传输无明显的影响,但对自动请求重发系统,时延会使传输效率降低。在传输电视信号时,如果图像和伴音信号的时延不同,会造成图像和伴音不合拍的现象。分组从 A 传送到 B 的时延定义为第一个比特离开 A 到最后一个比特到达 B 所经历的时间差。对于计算机数据业务,时延不是主要的问题。但对于实时传输的话音和图像业务,则对时延比较敏感。时延太大,会大大影响其业务质量。所谓时延敏感型业务,是指那些在传输过程中遭遇时延就会打断、分开分组,或有用程度明显下降的业务。在许多数据通信网中,若某个分组的时延超过某一标准,信息将被丢弃。可见,时延过大不仅会影响传输的实时性,还会引起误码率的增加。

系统的时延可以分成两大类。由于信息的传输速率引起的时延称为传输时延,由

于交换节点对信息的处理（打包、存储、排队等）引起的时延称为处理时延。分组交换的处理时延要比电路交换方式大。一般数字交换机的处理时延必须小于 $450\mu\text{s}$ ，如果在电话网中的总时延大于 25ms ，就应加装回声抵消器来消除回声。

传输时延 TD 是指由于数字信号在介质中传输所耽误的时间，它与电磁波在传输媒质中的速度有关，一般传输一公里引起的时延约 $4\mu\text{s}$ 。

处理时延包括打包时延 PD、交换时延 SD 和拆包时延 DD。

打包时延是指业务数据被拆装成分组时引起的时延，它实际是指打包器等待编码器输出一个分组净荷所需的时间，因而与业务速率有关。速率越高，打包时延越小。

交换时延 SD 又可分为固定交换时延 FD 和排队时延 QD 两个部分。当交换机内无其他分组等待交换时，分组进入交换机后，不需要排队，但需要进行交换处理，这就是固定交换时延（或零负荷传递时延）FD。FD 与交换速率有关：交换速率越快，FD 越小。当分组进入交换机后，发现还有其他分组在交换机内等待交换时，就必须先排队。由于排队引起的时延称为排队时延 QD，它决定于排队队列的长度：队列越长，QD 越大。

拆包时延 DD 是指业务在接收端或网络边界，为了除去网络时延抖动引入的附加时延。对于其他时延较小的信元，需要给它增加一个较大的时延；反之，对于其他时延较大的信元，则要给它增加一个较小的时延，使它们都与其他时延最大信元的时延一致。因此，如果选择其他时延最大信元的时延为代表，则不需要另外再考虑拆包时延 DD 了。

时延抖动和漂移：抖动和漂移描述的是数字信号的各有效瞬间对于标准时间的偏差，它们相当于进行了数字信号的相位调制，在稳定脉冲图形的前沿和后沿出现低频干扰调制。

抖动是指变化频率高于 10Hz 的相位变化，而漂移则是频率低于 10Hz 的相位变化。

抖动和漂移严重时，由于脉冲的移位，会使判决失误而出现误码。为了抑制抖动和漂移，可以选择合适的码型，或进行扰码，避免较长的连 0 或连 1；也可在接收端加缓冲存储器，以及采用再定时技术，使各部分信息的时延大体相同。

3. 描述传输速率的指标

为了有效地利用网络资源，需要规定用户业务的传输速率。对于恒定比特率业务，只需传输速率（比特率）这一个指标就够了，对于非恒定比特率业务，则还需要一些其他的指标。

平均速率是整个通信期间比特率的平均值；峰值速率是整个通信期间比特率的最大值；突发性是其峰值速率与平均速率的比值，它总是大于 1 的；峰值持续是峰值速率的持续时间。

4. 描述系统可靠性的指标

常用故障率或平均故障时间来描述系统的可靠性。故障率 λ 是系统在单位时间内

发生故障的概率。系统失效前的平均工作时间称为平均寿命时间 (MTTF)。相邻两次故障的平均间隔时间称为平均故障间隔时间 (MTBF)。排除故障需要的时间称为平均修复时间 (MTTR)。系统的可用性 A 表示系统在规定的条件下处于良好工作状态的概率, 即测试时间中可用时间所占的比率。显然:

$$A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

类似地, 不可用性表示测试时间中不可用时间所占的比率, 它等于 $1-A$ 。当连续出现 3 个严重误码秒时, 不可用性时间开始; 当出现 10 个非严重误码秒时, 最后一秒即为不可用时间的结束。

1.2 多路复用技术

多路复用技术就是用一条公共信道来建立多条独立传输信道的通信方式。在信息网络中主要采用频分复用、空分复用、时分复用、码分复用这四种复用技术。

1.2.1 频分复用

在频分复用中, 每一个载波代表一个信道, 传输一路信息。在发送端, 把不同用户的不同信息调制在不同的载波频率上, 通过混合器混合, 使其在同一条线路中传输。在接收端, 让复合信号通过不同的带通滤波器, 即可把各路信号分开。普通有线电视分配系统就采用这种频分复用方式。它最大的优点是设备简单, 但它对设备和传输链路的线性要求高, 容易受外界的干扰, 致使其传输质量不是很好。

1.2.2 空分复用

空分复用让不同的信息沿不同的物理线路传输, 每一条线路就是一个信道。例如有线电视光纤传输中分别用两根光纤来传输正向和反向信号, 就是一种空分复用方式。这种方式的技术简单, 但需要线路太多, 成本较高。

1.2.3 时分复用

时分复用主要用于数字传输系统。

时分复用是指各路信号利用同一信道的不同时间间隙 (时隙) 来进行通信。

因为数字信号是把时间上连续的模拟信号变为时间上离散的脉冲, 每个脉冲的持续时间很短, 只占整个信道传输时间的很少一部分, 因而可把多路信号放在一路信道中传输。

同频分复用相比, 时分复用有两个突出的优点。一是多路信号的复接与分接都采用数字电路, 比频分复用采用模拟滤波器分路要简单; 二是因为各路信号不在同一时

间传送，不容易产生交调、互调失真，时分复用系统对系统的非线性失真指标要求比频分复用系统要低。

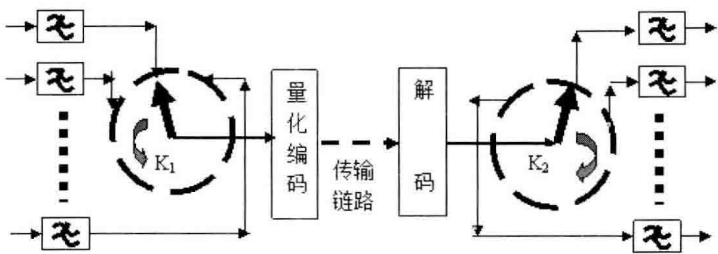


图 1-1 时分复用

图 1-1 是电话通信的时分多路复用示意图。各路信号 a、b、c、d、e……分别通过低通滤波器，滤除 3400Hz 以上的高频部分，加在快速旋转电子开关 k_1 的各个接口上， k_1 开关旋转一周的时间正好等于抽样周期 T_s ，使各路信号都经过相同的时间 T_s 被抽样一次，依次排列为…… $e_4d_4c_4b_4a_4$ …… $e_3d_3c_3b_3a_3$ …… $e_2d_2c_2b_2a_2$ …… $e_1d_1c_1b_1a_1$ ，送入 PCM 编码器进行量化、编码。经过传输信道到达接收端后，由解码器进行解码，并通过快速旋转电子开关 k_2 ，将…… $a_4a_3a_2a_1$ 、…… $b_4b_3b_2b_1$ 、…… $c_4c_3c_2c_1$ 、…… $d_4d_3d_2d_1$ 、…… $e_4e_3e_2e_1$ 、……分别送入各低通滤波器还原为模拟信号。图中的电子开关 k_1 同时起到了时分复用合路和抽样的作用。

为了使接收端能正确地还原发送端的信号，需要快速旋转电子开关 k_1 和 k_2 满足两个条件：一是旋转速度完全一致，二是当 k_1 同 a 路相接时， k_2 也应同 a 路相接。第一个条件称为同频，第二个条件称为同相。 k_1 和 k_2 同频同相时，称为收发端实现了同步。为了实现同步，需要在传输的码型中包含发送端的时钟频率成分，在接收端从其中提取发送端的时钟频率，用以控制接收端时钟，使其与发送端同频同相。

在我国和欧洲国家采用的数字电话 PCM 30/32 系统中，每一路分配一个时隙（称为路时隙），整个系统分为 32 个路时隙，其中 30 个路时隙传送 30 路电话，另两路用来传送同步信号和信令码。按照抽样定理，抽样频率应大于 $2F_{\max}$ ，其中 $F_{\max}$ 是语音信号的最高频率（3400Hz），国际电报电话咨询委员会 CCITT 建议取抽样频率 f_s 为 8000Hz，则抽样间隔 $T_s = 1/8000s = 125\mu s$ ，即每一路信号经过 $125\mu s$ 传送一次， T_s 也就是帧周期。因为时分复用的路数 $N = 32$ ，需将 $T_s = 125\mu s$ 分成 32 个时隙，则每个路时隙的时间为 $125/32 = 3.9\mu s$ 。每一路样值编码 $n = 8$ ，则每一路时隙包含 8 个位时隙，每个位时隙的时间为 $3.9/8 = 0.488\mu s$ 。因为每一路的数码率等于其抽样频率与量化比特数的乘积，则一路数字电话的数码率为

$$8 \times 8000 = 64\text{kb/s},$$

PCM30/32 系统的数码率

$$f_{cp} = nN f_s = 8 \times 32 \times 8000 = 2.048\text{Mb/s}$$

除图 1-1 所示把抽样与复用合一的方式以外，也可以先将各路信号分别抽样、量化、