

计算机类主干课程系列教材

计算机网络： 原理及应用

◎ 胡 鸣 聂 刚 编

A graphic element on the left side of the cover. It features a dark red background with a circular grid pattern. In the center is a bright orange sphere with the text "TCP/IP" written on it in a dark, serif font. Above the sphere, the binary sequence "1010101" is visible in a small, light font.

TCP/IP



科学出版社

计算

才

计算机网络：原理及应用

胡 鸣 聂 刚 主编

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书按照网络工程项目自下而上设计开发的方法,围绕网络技术的工程应用需求,结合计算机网络发展到“互联网+”时代演变自然规律,以数据融合为目标的平台体系结构为主线,由浅入深引入计算机网络的基础设施、服务组件与协议支持的组织结构以及协议实现的机制,全面揭示其内在网络数据应用驱动的必然性。以事实标准的 TCP/IP 协议族为核心,内容主要包括概论、网络链路、网络互连、网络传输、网络应用和网络安全。

本书适合高等院校网络工程专业的学生和教师参考,也适合从事网络工程的其他专业人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

计算机网络:原理及应用/胡鸣,聂刚主编. —北京:科学出版社,2016.10

计算机类主干课程系列教材 ISBN 978-7-03-050141-7

I. ①计… II. ①胡… ②聂… III. ①计算机网络-教材 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 238444 号

责任编辑:闫 陶/责任校对:黄彩霞

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2016 年 11 月第 一 版 印张:22 1/4

2016 年 11 月第一次印刷 字数:511 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

超大规模集成电路促进计算提速和组件“微粒”化,结合成熟的网络技术、计算能力强大的服务器和存储设备群组合成数据中心,展示“云计算”构成的个人和行业业务综合异构平台时,计算机网络已经突破其通信职能的限制,借助大数据处理技术助推,实现个人及行业数据融合,这就是今天的“互联网+”时代。个人通过庞大的网络支撑的多业务平台参与社会活动,包括即时信息沟通、在线学习、网上娱乐、在线预约、网上购物、网上支付、网上投资以及网上银行等。行业群体通过线上、线下业务流程集成对接,进行产业链资源整合,促使网上办公、电子商务以及其他行业业务流程不断精细化。不论是从未来发展战略层面还是从行业技术创新、转型以及个人创业的角度,“互联网+”既是机遇,也是挑战。

基于这样的背景,本书将从网络工程项目自下而上设计开发的角度,揭示支撑“互联网+”的奥秘,引导关注“互联网+”的读者,感悟计算机网络技术的价值与作用,为其自身和行业基于“互联网+”创新、转型和创业提供坚实的技术储备和支持。同时也引导信息技术类专业人士理解计算机网络技术的实现机制,为其领悟大数据计算思维的精髓,利用技术内在的潜能优化网络数据融合的应用设计,开发“互联网+”应用打下扎实的专业基础。

1. 本书的编写目标

“互联网+”构建快速增长的、线上线下关联的大互联网社区,形成用户极致体验、个性化定制服务和强烈主人翁参与意识的互联网文化,从而启发基于大数据分析决策的“互联网+”计算思维,引领行业创新、转型和个人创业的新常态。行业应用的精髓是数据,网络技术的发展带动计算机从以计算为中心向以数据为中心转移,在数据流层面实现行业业务数据乃至跨行业集成业务数据融合,并实现行业业务流程数据汇聚中的数据融合标准化,便于大数据处理。这样所形成的以数据为核心的技术,可称为数据技术。因此,“互联网+”就是信息技术到数据技术的升华。

从基于信息流的信息技术角度,注重网络基础设施、服务组件和协议支持之间的逻辑关联性和系统性,技术成分多而杂,其背后作用的机理较少揭示出来,难以追踪计算机网络技术的生命力,更难从“互联网+”大数据应用和未来发展战略背景去体验其应用驱动的必然性。学生需要学以致用、活学活用,高效准确地掌握所学网络技术,提升应用能力。因此基于数据流的数据技术,将计算机网络看成行业数据与跨行业数据融合的大平台而不是通信设备大系统,这样计算机网络技术学习背后就有强大的应用推动力。综上,计算机网络技术发展、“互联网+”行业应用需求与学生网络技术应用能力提高,是本书编写的原动力。

2. 本书的特点和内容

本书参编作者在武汉纺织大学都有多年针对不同类型本科生和不同学时(32、48和64学时)的计算机网络基础教学、网络原理教案设计与编写、教研项目研究的经验。这些实践

以及教学中获得的学生的反馈,为本书编写积累了素材,完善了本书内容组织。在此基础上,作者结合潜心的科研成果,逐步提炼出本书编写的特色。本书编写既不想写成网络技术应用说明书,也不想写成 TCP/IP 协议族的协议说明书,因此具有以下特点。

(1) 让读者站在网络工程项目设计开发者的角度,感受来自网络应用驱动的动力,理解网络技术形成的自然过程与必然性。

(2) 从数据流的数据技术角度,以数据融合为目标的平台体系结构为主线组织本书的各个章节部分,同时突出主流网络技术成分。

(3) 突出网络服务组件、协议支持与协议实现机制的差异,每章节进行了适当划分,便于教师和读者选择,其中带“*”号的部分适合感兴趣的读者或需进一步实现网络应用开发和平台数据集成的学生进一步阅读。

(4) 为了加深读者对计算机网络技术的应用感知,结合网络配置命令、应用操作、网页制作以及网络编程,激发读者将所学内容与实际的网络应用结合起来,提高计算机网络技术的认知、使用,甚至开发能力。

本书从满足读者易于阅读的角度,优化内容组织,各章节内容组织如下。

第 1 章概论,从通信角度引申出计算机网络/物联网的组成和性能指标,从网络计算机化过程引申出网络链路数字化、网络业务综合平台化和网络数据智能融合特征,再从其演变描述其形成与发展,进一步抽象通信模型引出基于数据融合平台为目标的计算网络体系结构及计算机网络定义与分类,然后对比理论模型 OSI/RM 和事实标准 TCP/IP 协议族。

第 2 章网络链路,从直接网络与网络链路、网络链路物理特性和网络链路数字化描述网络链路的通信基础,然后从网络链路协议特性、典型直接网络的接入与组织,以及网络链路的互连组件描述网络链路构成的网络,最后详细描述点对点接入、链路带宽共享接入与分组交换式多点接入的典型协议的实现机制。

第 3 章网络互连,对于不在同一直接网络的主机或数据终端设备,描述跨越不同直接网络技术壁垒,讨论互联网的组成,结合直接网段的划分、寻址和互连设备(路由器)的拓展,进一步描述网络互连的数据通信服务扩展能力,然后进一步描述数据转发和数据报路由选择协议实现机制。

第 4 章网络传输,从服务端点,端对端传输机制,到传输端口描述运输层的数据终端通信服务能力,然后基于运输层可靠性要求描述停止等待、连续重传和选择重传等确认机制,最后描述运输层三个不同协议 UDP、TCP 和 SCTP 的实现机制。

第 5 章网络应用,从网络数据处理的应用程序,到网络数据资源定位,到网络数据服务描述应用层的基本数据处理服务,然后通过移动交互平台、软件定义网络、云与大数据三个方面描述“互联网+”的数据融合服务平台,最后从网络交互语言、套接字编程和标准应用协议实现,描述应用层编程体系和协议实现。

第 6 章网络安全,可以涉及 TCP/IP 协议族 4 个层面的数据安全问题,因此它与第 2~5 章并行排列,通过网络安全威胁及现象、网络安全防范措施和典型应用的安全来描述网络安全基础,进一步围绕加密、认证和数字签名,以及其他安全防范技术方面介绍网络安全工具,最后讨论应用层安全、传输层安全、IP 安全和无线网安全描述网络安全协议。

附录 1~5 分别介绍第 1~5 章需要的 Unicode 代码和数制表示、差错检测编码(CRC

和校验和)、各种标记语言、网络配置命令和客户服务器编程。

此外,带“*”号的章节提供教师为信息技术类学生授课的选择,带“**”号的小节部分教师可以按照课时要求加以选择。

本书由武汉纺织大学的胡鸣和聂刚担任主编,胡鸣负责全书总体规划、审稿、最后统稿和第1章与第2章的编写。聂刚负责实验部分和第3章的编写。彭涛负责第4章的编写。陈常念负责第5章的编写。孔维广负责第6章的编写。苏勇负责附录与全书习题部分。

感谢王艳在学习期间为本书提供大量的素材。由于本书编写仓促、水平有限,书中不足,敬请读者不吝赐教,以便于进一步修订和补充。读者任何建议和批评请直接发到电子邮箱 283321240@qq.com 或 375402987@qq.com。我们的所有努力都是为读者选择最佳支点,助力达到“互联网+”应用能力拓展的最高境界!

编 者

2015 年 12 月

目 录

第 1 章 概 论

1.1 计算机网络形成与发展	(1)
1.1.1 网络组成及要求	(1)
1.1.2 网络计算机化	(7)
1.1.3 网络发展阶段演变	(13)
1.2 计算机网络体系结构	(18)
1.2.1 计算机通信模型抽象	(18)
1.2.2 网络体系结构组成	(21)
1.2.3 计算机网络定义及分类	(29)
1.3 两种典型的标准框架	(33)
1.3.1 OSI/RM 模型	(33)
1.3.2 TCP/IP 协议族	(36)
1.3.3 两种体系结构的对比	(41)
习题 1	(44)

第 2 章 网络链路

2.1 网络链路通信基础	(46)
2.1.1 直接网络与网络链路	(46)
2.1.2 网络链路物理特性	(48)
2.1.3 网络链路数字化	(63)
2.2 网络链路构成的网络	(80)
2.2.1 网络链路协议特性	(80)
2.2.2 典型直接网络的接入与组织	(97)
2.2.3 直接网络的链路互连组件	(112)
2.3 网络链路协议实现	(122)
2.3.1 典型点对点接入协议	(122)
2.3.2 典型链路带宽共享接入协议	(137)
2.3.3 典型分组交换式多点接入协议	(156)
习题 2	(162)

第 3 章 网络互连

3.1 互联网	(165)
3.1.1 互联网的组成	(165)
3.1.2 IP 地址	(166)
3.1.3 划分子网	(168)

3.1.4 无类域间路由	(171)
3.1.5 IP 转发的再讨论	(172)
3.1.6 网络互连设备:路由器	(173)
3.2 数据转发协议*	(175)
3.2.1 数据报传送	(175)
3.2.2 IPv4 分组格式	(175)
3.2.3 IPv4 数据报分段与重组	(177)
3.2.4 IP 中的数据报转发	(179)
3.2.5 地址解析协议	(182)
3.2.6 差错报告	(184)
3.2.7 下一代网际协议 IPv6(IPng)	(186)
3.2.8 多协议标记交换**	(193)
3.3 路由选择协议*	(197)
3.3.1 用图表示网络	(198)
3.3.2 距离向量	(199)
3.3.3 链路状态	(204)
3.3.4 度量标准	(210)
3.3.5 域间路由	(212)
3.3.6 路由区	(218)
3.4 多播	(219)
3.4.1 多播地址	(220)
3.4.2 多播路由(DVMRP,PIM,MSDP)	(221)
习题 3	(229)

第 4 章 网络传输

4.1 运输层介绍	(233)
4.1.1 服务端点	(233)
4.1.2 端到端的通信机制	(233)
4.1.3 传输端口及作用	(235)
4.2 协议实现*	(236)
4.2.1 UDP 协议	(236)
4.2.2 TCP 协议	(239)
4.3 SCTP**	(251)
4.3.1 SCTP 协议的相关知识	(252)
4.3.2 SCTP 协议消息	(253)
4.3.3 SCTP 的功能	(254)
习题 4	(256)

第 5 章 网络应用

5.1 应用层	(259)
5.1.1 应用进程	(260)

5.1.2 网络资源定位与服务	(262)
5.1.3 网络数据服务	(269)
5.2 互联网+	(272)
5.2.1 移动交互平台	(272)
5.2.2 软件定义网络	(273)
5.2.3 云与大数据	(274)
5.3 编程与应用协议实现	(276)
5.3.1 网络交互语言	(277)
5.3.2 套接字接口编程**	(281)
5.3.3 标准协议实现*	(285)
习题 5	(293)

第 6 章 网络安全

6.1 网络安全基础	(295)
6.1.1 网络安全的含义	(295)
6.1.2 安全威胁方式	(296)
6.1.3 安全防范措施	(297)
6.1.4 典型应用安全	(298)
6.2 网络安全技术	(299)
6.2.1 数据加密技术	(300)
6.2.2 数字签名和认证技术	(303)
6.2.3 防病毒技术	(304)
6.2.4 防入侵技术	(305)
6.2.5 防火墙技术	(310)
6.3 网络安全协议*	(313)
6.3.1 应用层安全(PGP)	(313)
6.3.2 运输层安全协议 SSL	(315)
6.3.3 网络层安全协议(IPSec)	(318)
6.3.4 无线网安全协议	(321)
习题 6	(324)
附录 1 Unicode 代码和数制表示	(326)
附录 2 差错检测编码(CRC 和校验和)	(329)
附录 3 标记语言(实践 1)	(331)
附录 4 网络配置命令(实践 2)	(337)
附录 5 客户服务器编程(实践 3)	(341)

第 1 章 概 论

每天手机关注微信、微博、QQ、头条时,每天办公室计算机都有程序自动更新和新的应用程序请求添加时,外地通过 OA(Office Automation)办公以及网上购物时,当你间隔时间选择下一集电视剧时,是什么支撑着我们与外界的关联,默默地为我们提供服务?它就是本书要学习的计算机网络。它凝聚着计算机技术与通信技术的紧密结合和相互促进的发展成果,也带来互联网+,乃至未来发展的繁荣与辉煌。本章揭晓计算机网络的形成与发展,认知其内部体系结构以及两个影响最大的计算机网络体系结构设计的竞争。

1.1 计算机网络形成与发展

摆在人们面前的互联网+背后的计算机网络,怎么感知其存在价值和作用?怎么与人们目前讨论的互联网+热点关联?计算机网络又是怎么一步一步进入今天这样的程度?这就是本节要回答的问题。

1.1.1 网络组成及要求

1. 计算机网络组成

1) 通用计算机作为网络终端

电的发现导致有线和无线电通信,也带来电话和电报应用的繁荣,从此人类的语音和文字通信就得到了大范围延伸与扩展。

1836 年美国艺术家 Samuel F. B. Morse、物理学家 Joseph Henry 和 Alfred L. Vail 开发了电报系统。电报的发明激发无线电通信的发明,1864 年 James Clerk Maxwell 证明无线电存在,1888 年 Heinrich Rudolf Hertz 证实 Maxwell 理论,直到 1894 年,意大利发明家 Guglielmo Marconi 建了第一个无线电报通信系统。点、划和中间的停顿构成的莫尔斯电码(Morse codes),可以是音调平稳时断时续的无线电信号传送,也可以是电线里的电子脉冲,甚至还可以是机械的或视觉的信号(如闪光)。莫尔斯电码引入了最早编码的数据,电报通信因此成为最早的数据通信。将语言文字内容和数字一起简化用莫尔斯电码的电报通信,在许多紧急和求救环境,尤其是泰坦尼克号游轮首航遇险时最后的莫尔斯电码求救,得到广泛应用,直到计算机网络广泛应用的今天,电报通信业务才被计算机通信所替代。

贝尔(Alexander Graham Bell)的祖父、父亲和兄弟一直从事朗诵和演讲,与母亲和妻子的耳聋形成了强烈反差,这激发了他研究听力设备的强烈兴趣。1876 年 3 月 10 日,他终于成功获得专利,发明了有线电话,通过送话机与实验室的助手沃森首次通话成功。次年,开通从波士顿到纽约长距离电话线的通话。1878 年,贝尔电话公司挂牌成立,开始广受欢迎的电话通信业务。1880 年贝尔因为电话发明获得法国政府 5 万法郎的奖金,开启现代高端信息技术的发源地——贝尔实验室的未来。越来越受美国大众青睐的电话通信,促进了

1880 年全美范围的长途电话项目。此时,电报通信也纳入公司的业务范围,进一步导致 1885 年美国电话和电报(American Telephone and Telegraph, AT&T)公司成立。

计算机从远古追溯到算盘,1642 年的 Blaise Pascal 机械计算器,1673 年的 Gottfried Leibniz 基于二进制数制的数字机械计算器,1822 年 Charles Babbage 和 1906 年其子进一步完善的第一个可编程自动机械计算器,到 1936 年 Alan Turing 的图灵机模型启发的 Colossus Mark 系列和 1945 年 John von Neumann 程序存储模型的数字计算机 ENIAC (1946 年建成)。数字计算机从电子机械、电子管,到双极性晶体管的发明,才开始摆脱高成本、计算能力低下的沉重负担,极大地激起大范围计算机应用的兴趣。计算能力的增长是从 1952 年公开的集成电路报告开始的。1958 年 Jack Kilby 发明了第一个基于锗杂质实际可用的集成电路。相隔半年,Noyce 用硅替代锗解决集成电路的稳定问题。Fairchild 半导体公司生产由硅片构成的半导体集成电路,开创了微型计算机的新时代。

计算机小型化和成本的降低,使得大量机械控制部分采用“计算机”内核,贝尔公司开始从人工交换机到机械步进式自动交换机,再到计算机控制的程控交换机,大面积程控交换机的更新,导致 AT&T 公司通用计算机需求的增长,而且 AT&T 公司贝尔实验室的研究异常活跃,八个诺贝尔奖奖金获得者、更多专业领域奖金获得者和信息领域的开拓者来源于该团队,从射电天文学、晶体管、激光、电耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)、信息论、UNIX 操作系统,到 C 语言和 C++ 程序设计语言类。1972 年贝尔实验室的 Dennis Ritchie 创建了 C 语言,并和 Ken Thompson 一起开发了计算机最早的多任务应用平台 UNIX 操作系统。大量用 C 语言编写的 UNIX 操作系统移植性好、装机快,加上基于 UNIX 平台和 C 语言更好地开发更多应用的能力,促进了计算机的快速部署和展开。

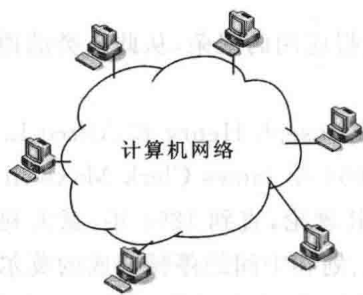


图 1-1 早期的计算机网络(狭义的计算机网络)

20 世纪 50 年代末,伴随集成电路技术和计算机应用的成长,多个通用计算机之间交互信息的需求变得越来越迫切。从军事领域开始计算机通信,伴随计算机逐步在民用领域的部署与展开,计算机通信的规模越来越大,慢慢形成了图 1-1 所示的计算机网络。

2) “计算机化”节点作为网络终端

超大规模集成电路(VLSI)的集成度,达到每块芯片所包含的元器件数在 10^5 以上。20 世纪 90 年代以来,集成电路工艺发展非常迅速,已从亚微米($0.5 \sim 1 \mu\text{m}$)进入深亚微米(小于 $0.5 \mu\text{m}$),进而进入超深亚微米(小于 $0.25 \mu\text{m}$)。2008 年年初,十亿晶体管的处理器已经商用,从当时的 65 nm (纳米)进入 45 nm。大规模集成电路技术朝两个方向发展:一是在发展微细加工技术的基础上,开发超高速、超高集成度的电路;二是迅速、全面地利用已达到的或已成熟的工艺技术、设计技术、封装技术和测试技术等,发展各种专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)。20 世纪 80 年代开始,结合硬件设计语言、可编程逻辑,逐步实现自动化和逻辑合成布局,再加上计算机实现的高精度激光光刻技术用于实现结构化设计,极大地促进了定制硬件设计的自动化。对于计算机网络而言,前一方向在于增强数字信号处理技术和速度,后一方向在于更多控制功能和管理功能用更小体积的硬件实现。



图 1-2 现代计算机网络或物联网(广义的计算机网络)

2. 通信链路的可靠性、性能和安全

计算机网络从计算机之间的通信角度,继承了有线电话和无线电报通信的技术成果。而通信传输介质的质量直接影响通信链路的可靠性、性能和安全。计算机网络作为一个大的计算机系统,其有效性直接依赖于分布在网络上计算的效率,而这个又与网络传递计算数据的效率有关。早期的程序格言“首先让其正确,然后让其快”,这同样也适用于计算机网络。计算机网络的可靠性与性能取决于实际通信链路的条件,主要涉及如下。

1) 信噪比

计算机网络、电话通信和电报通信一样需要通信链路,计算机的数字信号在传输介质上的传输过程,也会伴随产生无用的信号成分、噪声。实际上,噪声存在于所有的电子设备和传输介质之中,因此关注信噪比

$$\text{信噪比} = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) (\text{dB})$$

其中, S 为信号的平均功率; N 为噪声的平均功率。例如, 当 $S/N=1000$ 时, 信噪比为 30 dB。

信噪比是评估通信链路质量的基本指标,因为这个指标会影响数据传输速率和质量,从而也影响数据传输的可靠性,即可能出现发送的数据与接收的数据不一致。通信链路的距离增加会降低信号传输保真度,即导致信号的平均能量降低,影响编码后数据在通信链路另一端的数字数据的恢复,影响数据编码的传输速度和延迟;传输媒介不同,信号的抗干扰能力不同,如短波无线电的多径效应,随着传输距离增大、中间设备甚至周边环境辐射增强,噪声平均功率也大幅增加。通信链路质量保证的最大问题是,在一定距离时,增加中间节点放大有用信号的同时,也会放大所在点的无用信号噪声。信噪比直接影响数字信号传输速度

和数字信号传输的可靠性。

电话与电报通信直接为人类服务,许多人为调节成分较高。例如,声音小、听不清可以让对方声音大一点,效果不好也可以调节接收音量等,而计算机通信是利用其运行应用程序的数据通信功能间接为人类服务的,因此处理通信链路信噪比则需要数据通信链路本身自适应、自动化调节完成。

2) 误码率或误比特率

与电话通信不同,通信链路信噪比通过传递数据的正确性与错误性反映计算机网络传输的可靠性。但是受链路信号传递距离、链路不同传输媒介抗干扰能力以及噪声的影响,信噪比有不同程度的降低,数据传输过程中可能出现误码,如发送信号数据是“1”,而接收的信号数据却是“0”,也就是发生数据差错。误码率(Bit Error Rate, BER)是衡量数据在规定时间内数据传输精确性的指标,即

$$\text{误码率} = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}}$$

$$\text{误比特率} = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}}$$

误码率和误比特率是两种不同的描述数据误码的方法,是常用的数据通信传输质量的指标,它表示“多少位数据出现一位差错”,这与电话通信质量清晰度的主观指标不同。例如,一万位数据出现一位错,则误比特率为 10^{-4} 。这意味着链路传送 1250 B 的数据块就必然出错,因为 $1250 \text{ B} = 1250 \times 8 \text{ bit} = 1 \times 10^4 \text{ bit}$,有一位错,对于数据来说,这一块就不可用,除非有冗余位的纠错机制。因此对于固定 1250 B 的数据块而言,每块出错的概率就是 100%。假定每比特的出错独立,且误比特率为 p_b ,另外设数据块长为 $L(\text{B})$,则数据块的差错率为

$$p = 1 - (1 - p_b)^{L \times 8}$$

若误比特率为 10^{-4} ,则每位不出错的概率为 $1 - 10^{-4}$,即 0.9999。对于 32B 的块来说,不出错的概率就为 $(1 - 10^{-4})^{32 \times 8}$,那么 32B 块的出错概率为 $1 - (1 - 10^{-4})^{32 \times 8} = 1 - (0.9999)^{256} = 0.0253$,即 2.53% 的块出错率,对于 1000 个固定 32 B 块大约就有 25 块有错。因此小块出错的机会明显减少。

任何一位的传输错误都一定会带来计算数据的不正确,这种不正确产生的效果可能是灾难性的,因此计算机网络必须通过差错识别或控制来解决误码率带来的可靠性与可用性问题。

3) 带宽和时延

计算机数据传输的快慢与两个测量的性能指标,即带宽(bandwith)和时延(latency)有关。带宽源于电话通信连续时间信号频率的变化范围,如语音信号的频率从 300 Hz 到 3300 Hz,带宽就是 $3300 - 300 = 3000 \text{ Hz}$ 。与电话通信不同,链路的数据带宽是给定时间周期内链路所能达到的“最高数据率”,这与链路的通信技术水平有关,单位为“每秒比特”或“bit/s”,一般用于测量链路的数据传输能力。还有的数据单位是千比特每秒,即 Kbit/s (10^3 bit/s);兆比特每秒,即 Mbit/s (10^6 bit/s);吉比特每秒,即 Gbit/s (10^9 bit/s);太比特每秒,即 Tbit/s (10^{12} bit/s)。例如,以太网链路数据带宽 100 Mbit/s 就是每秒钟能传送 100 Mbit 数据。有时带宽可以想象为传输每位数据所花的时间。如果在网络中某一个点上观察数字信

号流随时间的变化,那么,信号在时间轴上的宽度就随着带宽的增大而变窄。例如,当信号为1和0相间的脉冲时,在带宽为1 Mbit/s的链路上每比特在时间轴上的宽度为 $1\mu\text{s}$,但在带宽为4 Mbit/s的链路上,每比特在时间轴上的宽度就减小到原来的四分之一,即只有 $0.25\mu\text{s}$,如图1-3所示。

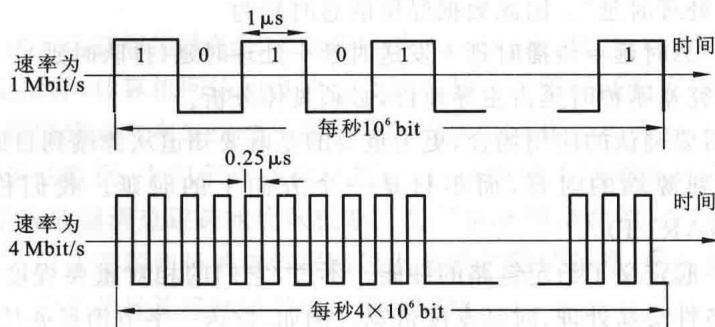


图 1-3 两种不同带宽对比

链路发送和接收技术越复杂,每位占用的时间宽度可能变得越窄,因而带宽就越宽。但从运行应用程序(进程)到进程的数据传输路径来看,带宽更为复杂,涉及中间节点可能出现的处理时间、不同链路带宽以及可能的数据变换等。而且因为链路出错,出错的数据需要重传,而且有时需要对传送的数据进行确认,因为处理延迟和相关的机制使得数据实际传送的速率远低于信道带宽。这种情况,往往用吞吐量来测量系统的性能,即单位时间内通过网络(或信道、接口)的位数、字节数或数据帧数,即

$$\text{吞吐量} = \frac{\text{数据消息的长度(位、字或帧)}}{\text{消息传送的时间(s)}}$$

吞吐量受网络通信路径中各段链路的带宽或额定速率限制,往往某段最低速率的链路是吞吐率的性能瓶颈。例如,两个数据终端中间经过两个不同带宽的链路,带宽低的链路则影响整个传输路径的带宽,也就是路径的吞吐量。

另外一个性能测度,即时延,就是数据消息从网络一端到另一端传送所花的时间。与带宽一样,单个链路时延与端到端的数据传输路径时延的讨论是不同的。对于单个链路来说,链路时延由发送时延和传播时延两个部分组成。因为链路带宽就是链路数据发送的最高速率,所以发送时延与链路数据带宽成反比,为每位数据需要的时间乘以所传消息的位数,即

$$\text{发送时延} = \frac{\text{数据消息的度(bit)}}{\text{链路数据带宽(bit/s)}}$$

传播时延与链路媒介的物理特性有关,它是电磁波在物理媒介上传播一定距离所花费的时间,也就是一位数据从发送端开始发送到该位到达接收端开始接收需要的时间,即

$$\text{传播时延} = \frac{\text{物理链路距离(m)}}{\text{链路上光传播速率(m/s)}}$$

光在不同链路媒介上的传播速度不同,在真空中光的传播速度为 $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$,在电缆中为 $2.3 \times 10^8 \text{ m/s}$,在光纤中为 $2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。对于同样23 km的链路长度,无线电波的传播时延约为 $77\mu\text{s}$,电缆的传播时延为 $100\mu\text{s}$,而光纤的传播时延为 $115\mu\text{s}$ 。可以看出,虽然光纤比电缆链路数据带宽高、传送速度快,但光纤的传播时延最长。因此提高链路带宽只

减少发送延迟,但传播时延与链路的长度和链路上光的传播速度有关。

对于端到端的数据传输路径而言,除了发送时延和传播时延,在节点缓存队列中分组队列所经历的时延是“处理时延”中的重要组成部分。“处理时延”的长短取决于当时的通信量,但当网络的通信量很大时,还会产生队列溢出,这相当于处理时延为无穷大。有时可用“排队时延”作为“处理时延”。因此数据经历的总时延为

$$\text{总时延} = \text{传播时延} + \text{发送时延} + \text{处理时延(排队时延)}$$

在总时延中,究竟哪种时延占主导地位,必须具体分析。

在许多数据需要确认的应用场合,更为重要的是既要知道从源端到目的端的时延,也要知道从目的端回到源端的时延,而不只是一个方向上的时延。我们称其为往返时延(Round-Trip Time, RTT)。

带宽和时延一起定义了给定链路的性能。不过,它们的相对重要程度则取决于网络应用本身。对于事务性交易处理,时延支配带宽。例如,发送一字节消息并接收一个消息的回应是时延敏感的。假定计算对响应没有影响,则跨国链路的 100 ms 往返时延和房间内链路的 1 ms 往返时延差别是很大的。不管链路带宽是 1 Mbps,还是 100 Mbps,相对而言就不是那么重要了,只不过前者完成 1B 的传输为 $8\ \mu\text{s}$,后者需要 $0.08\ \mu\text{s}$ 。

对照来看,考虑数字图书馆要求 25 MB 图像。可用带宽越多,图像返回给用户就越快。此处,链路的带宽决定性能。带宽 20 Mbps 的链路花 20 s 传回图像,则 100 ms 和 1 ms 往返时延,就显得相对不重要了,因为响应时间 20.001 s 和 20.1 s 的差别可以忽略不计。

4) 时延带宽积

如果把单个链路看成一个长为时延、宽为带宽的管道,则

$$\text{时延带宽积} = \text{时延(传播)} \times \text{带宽}$$

根据以上公式可以得出,链路的时延带宽积就是以比特为单位的链路长度。若设某段链路的传播时延为 20 ms,带宽为 10 Mbps,则时延带宽积 $= 20 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^6 = 2 \times 10^5\ \text{bit}$ 。这表示,若发送端连续发送数据,则在发送的第一比特即将到达终点时,发送端就已经发送了 20 万比特,而这 20 万比特都正在链路上传输,因此时延带宽积可以看成滞留在链路中间的数据容量。这个参数对于数据发送端、接收端,乃至中间节点的缓存大小的设计都有直接的影响。表 1-1 列出了常用的几种链路类型的时延带宽积,其中的无线局域网和卫星的传播时延是按真空中的光传播速度来计算的,而拨号上网是按电缆中光的传播速度计算的。

表 1-1 时延带宽积的样例

链路类型	带宽(典型的)	距离(典型的)	往返时延	时延带宽积
拨号上网	56 Kbps	10 km	$87\ \mu\text{s}$	5 bit
无线局域网	54 Mbps	50 m	$0.33\ \mu\text{s}$	18 bit
卫星	45 Mbps	35 000 km	233 ms	10 Mbit
跨国光纤	10 Gbps	4 000 km	40 ms	400 Mbit

5) 安全

与电话通信、电报通信一样,只要获得链路的信号,并且能够解析信号携带信息,尤其是

这些信息带来的价值和作用的重要性,如军事领域和经济领域的信息,就能为人为攻击方提供挖掘信息价值的机会,而数字数据甚至可以提供分段截获、中断、篡改和伪造的机会,这给数字数据的真实性、保密性以及电子商务交易取证带来问题。因此在保证正常数据共享、数据融合的基础上,同时还要避免不正常破坏共享的数据、数据融合的可信度和一定范围的数据的私密性。

基于多个具体通信链路组成的网络链路信噪比、误码率、带宽、时延和时延带宽积的可靠性、性能和安全指标,计算机网络的设计变得错综复杂。要保证数据的正确性,针对存在一定误码率的通信链路必须在发送端采用冗余的数据编码作为校验码,以便接收端用来检错。对于发现错误的链路,中间节点缓存限制、通信链路或中间节点故障等引发的数据丢失,有可能需要采取数据消息跟踪或确认机制。为了提升网络性能,发端、中间节点和收端必须协调最大化利用从源端到目的端数据路径上各段链路的带宽,同时减少时延对不同应用的冲击。安全问题也是计算机网络必须考虑的问题。

1.1.2 网络计算机化

计算机的数字化数据处理,导致计算机网络的数据传输,因此计算机网络的另外一个名称就是数据网络。20世纪90年代,Sun公司首席执行官 Scott McNealy 曾提出了“网络计算机”的概念。不同于传统的电话、电报和电视等业务网络,计算机网络的“计算机”赋予了网络发展、繁荣、不断壮大的生命力,使得计算机网络在这种“计算机化”驱动中具有三大别具一格的特征:网络链路数字化、网络业务集成平台化和网络数据智能融合。

1. 网络链路数字化

1) 网络链路数字化的技术基础

计算机内部存储和处理的都是0,1二进制数字化的数据,因此这些数据在计算机网络链路上,或者直接传送(短距离有线),或者为了正确接收经过数字编码转换(长距离有线),或者经过调制解调转换在特定信号介质上传送。这些数据经过接收端主机运行的应用程序(进程)处理或存储最终可能作为目的主机应用平台(操作系统)共享的资源,而且可以和其他数据汇聚提供行业业务流程上其他业务节点的服务,这就是数据融合的思想。

早期的计算机网络的通信链路大部分可以利用现有电话网络的基础设施,也可以建立自己的通信基础设施。电话网络规模最大,电报网最早并入其中,其后的有线电视网络也基本上组建以同轴电缆为基础的通信基础设施。但早期的电话语音信号和电视视频信号都是基于时间连续的模拟信号,而电报和计算机网络传送的是数字信号,都能在通信链路上传输。由于基础的通信链路无法区分不同的业务信号,早期电话网络、有线电视网络和计算机网络构成各自独立的业务网。不利于通信基础设施的共享和通信链路利用率的提升。

不过,计算机处理来自外部设备模拟信号的方法就是让它们数字化,这样便于模拟信号的数据采集、数据处理、数据存储甚至数据融合,这类需求导致语音和视频信号数字化进入计算机中,而数字化数据抗噪声能力强,且增加中间节点可以再生出原来的信号,而连续时间的模拟信号长距离传输衰减大,中间节点只能放大信号,但放大本身既可以放大信号的有效成分,也可以放大信号的噪声。长途通信链路数字化使得长途电话,甚至国际长途电话的效果与市内电话的效果一样。通信链路数字化的优点在远距离传输上引起了重视,但模拟

信号数字化的结果,带来更高的数字链路数据带宽,使得链路数字化的步伐受到制约。

2) 网络链路数字化的特征

网络链路数字化是从长距离干线链路开始的。高带宽的光纤技术投入使用,促进大面积长距离通信链路的数字化,这些长距离高数据带宽的通信链路是各个网络的骨干链路,利用数字化时分复用技术划分成多个具有时间间隙(时隙)的“数字隧道”,电话、电视和计算机网络的业务数字信号,通过接入节点在骨干链路上静态到动态选择空闲的“数字隧道”传输,从而达到各业务网络共享这些骨干链路(也称为干线链路),使得这些骨干链路数据带宽的利用率达到最高。光纤、卫星、微波为基础的数字化骨干网络链路,成为各国大力发展的信息基础设施,从1993年美国公布的国家信息基础设施(National Information Infrastructure, NII)建设计划开始,逐步驱动全球的“信息高速公路”,既为电话网、有线电视网、计算机网“三网合一”创造了技术条件,也为全球信息互通提供了良性的网络环境。基础的信息基础设施不再打上业务网络的标记,而在网络链路数字化的基础上实现业务数据融合。

接入链路(从用户终端到网络干线节点)数字化是从有线、无线和移动逐步展开的。实际上,随着超大规模集成电路技术的发展,接入计算机网络的“计算机”通信接口的数据处理能力大大增强,而且集成电路比分立元件有更高的抗噪声干扰能力,也便于更为智能的信号处理,使得传统模拟信号处理技术逐渐在通信领域淡出,而大幅度地增强数字信号处理的算法研究。这也使得接入链路的数字化步伐加快,办公室与家庭有线接入的数据带宽从早期的1.2 Kbps速度提高到目前的100 Mbps级以上的“宽带”水平。许多小区和办公大楼已经有光纤到户。2002年6月,IEEE 802.3ae通过了10 Gbps的以太网标准,使得光纤局域网、城域网和广域网的界限变得模糊。同时出现了不依赖于固定设施的Wi-Fi、蓝牙、ZigBee和NFC(Near Field Communication)的无线个人区域网络技术,美国德州仪器(Texas Instruments, TI),是全球领先的半导体公司,目前开发的无线单片机CC2530已经将较强的计算能力和ZigBee通信接口集成在一个指尖大小的芯片内,这使得各种超小的传感器和其他控制节点联网得到广泛应用,而基于第一代(Generation, 1G)蜂窝无线电话,移动互联网从二代(2G)、三代(3G),逐步向四代(4G)迈进,其4G的无线传输的数据带宽目前已经超过100 Mbps,接近300 Mbps。

2. 网络业务集成平台化

1) 网络业务集成平台化的技术基础

计算机在操作系统的平台支持下可以实现多个网络应用业务,使得计算机网络中的计算机与单一业务的电话、电报和有线电视的通信终端不同。计算机应用平台化的特色导致计算机网络支持的不只是计算机通信,而是运行的计算机应用程序(进程)之间的通信,如计算机上运行浏览器、QQ、MSN、Skype和各种网络游戏,各自独立按自己的数据表示规范和格式实施数据传输等,因此,计算机网络支撑计算机平台的协作。而这种平台协作促进更多行业网络应用业务的诞生并实现业务集成,这也是计算机网络发展最快,应用范围最广,超越了发展规模最大电话网络。

计算机平台在大网络环境中的协作反过来促进商用操作系统平台的快速发布,1976年乔布斯(Steve Paul Jobs)开创以电视作为显示器的苹果公司,支持图形化用户接口界面