

通信网络理论与应用

马东堂 赵海涛 黄圣春 王海军 编著



科学出版社

通信网络理论与应用

马东堂 赵海涛 黄圣春 王海军 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了通信网络的基础理论和应用,理论与实际相结合,通俗易懂、实用性强。全书共9章,主要内容包括通信网概述、排队论基础、通信网建模理论、通信网中的传输与交换、多址接入协议、图论与路由、流量控制和拥塞控制、网络性能分析与仿真,以及通信网络理论在无线自组织网络中的应用等。

本书既可作为通信工程、信息工程、网络工程及其他相关专业的高年级本科生和研究生的教材,又可供从事研究开发的相关工程技术人员参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

通信网络理论与应用/马东堂等编著. —北京:科学出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-03-053267-1

I. ①通… II. ①马… III. ①通信网—研究 IV. ①TN915

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 128536 号

责任编辑:潘斯斯/责任校对:桂伟利

责任印制:吴兆东/封面设计:迷底书装

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>

北京中石油彩色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

*

2017年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:331 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

通信网是现代信息社会的重要基础设施,通信网的快速发展对通信网络理论提出了迫切的发展需求。本书系统介绍了通信网络的基础理论,并结合无线通信网络的发展分析了通信网络理论的应用案例。力求使读者掌握通信网络的基础知识、相关理论和分析方法,了解通信网络最新技术以及发展趋势,并为进一步的通信网络的研究、开发、设计、规划、管理和维护打下坚实的基础。

本书的主要特点如下。

(1)力求通俗易懂、深入浅出,既突出基础理论知识的完备性,又兼顾贴近工程实践的实用性。

(2)应用案例侧重通信网络理论在无线通信中的应用,反映该领域的最新研究进展。

全书共分9章。第1章从通信网络的基本构成与分类入手,介绍网络分层体系结构及功能、网络性能的评价指标体系以及通信网的发展趋势;第2章介绍排队系统建模、排队系统的主要性能指标、Little公式,以及系统性能分析方法;第3章讨论通信网的建模理论;第4章介绍通信网中的传输与交换技术;第5章介绍多址接入协议,分别讨论静态接入和动态接入方案;第6章介绍图论与路由,以及图论在网络流量分配中的应用;第7章介绍流量控制和拥塞控制理论,包括通过限制发送数据量的流量控制技术、最大流算法,以及拥塞控制算法;第8章讨论网络性能分析与仿真方法,介绍OPNET、NS2/3等网络性能仿真软件;第9章讨论通信网络理论在无线自组织网络中的应用。

本书既可用作通信工程、信息工程、网络工程及其他相关专业的高年级本科生和研究生的教材,又可供从事研究开发的相关工程技术人员参考和借鉴。

本书的作者都是长期工作在通信网络教学和科研一线的人员。全书的大纲拟定、统稿、定稿由马东堂完成。第1、3、7章由马东堂和王海军执笔,第6、8、9章由赵海涛执笔,第2、4、5章由黄圣春执笔。国防科技大学的魏急波教授对本书的编写提出了许多宝贵的指导意见,研究生程然、解来历为本书的编写提供了部分素材。在此一并表示感谢。

同时,在本书编著过程中参考了大量国内外文献和著作,在此对这些文献和著作的作者表示衷心的感谢。

本书涉及通信网络领域广泛的理论和技术问题,由于作者的知识局限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2017年5月于国防科技大学

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 通信网的构成与分类	1
1.1.1 通信网的基本构成	1
1.1.2 通信网的分类	2
1.2 通信网体系结构与网络协议	3
1.2.1 通信网体系结构	3
1.2.2 网络协议及其功能	4
1.3 通信网的服务质量和性能指标	7
1.3.1 通信网的服务质量	7
1.3.2 通信网的性能指标	8
1.4 通信网的基本理论问题	9
1.5 通信网的发展趋势	10
习题	12
第2章 排队论基础	13
2.1 排队系统模型	13
2.1.1 输入过程	14
2.1.2 排队规则	16
2.1.3 服务机制	17
2.1.4 排队系统的符号表示	19
2.2 排队系统的性能指标	20
2.3 Little 公式	21
2.4 M/M/m/n 排队系统	22
2.4.1 古典解析法	23
2.4.2 近代解析法	25
2.4.3 M/M/m/n 排队系统的特殊模型	29
2.5 M/G/1 排队系统	30
习题	36
第3章 通信网建模理论	38
3.1 通信网的业务特点	38
3.2 通信业务源的概率模型	38
3.2.1 业务建模的基本准则	38
3.2.2 连续时间业务源的建模	39

3.2.3	连续型概率分布	44
3.2.4	离散型概率分布	46
3.3	典型通信业务源的建模	47
3.3.1	独立随机事件的建模	47
3.3.2	实际业务源的建模	48
3.4	通信网络的排队建模	49
3.5	典型通信网络的建模	50
3.5.1	电路交换网的建模	51
3.5.2	分组交换网的建模	51
3.5.3	ATM 网络的建模	52
3.5.4	移动通信网的建模	52
习题		53
第 4 章	通信网中的传输与交换	55
4.1	传输链路	55
4.1.1	传输媒介	55
4.1.2	传输复用	57
4.1.3	差错控制	60
4.2	交换技术	67
4.2.1	电路交换	69
4.2.2	分组交换	74
4.2.3	快速分组交换	78
4.2.4	软交换	84
习题		87
第 5 章	多址接入协议	90
5.1	静态分配方案	90
5.1.1	频分多址接入	91
5.1.2	时分多址接入	91
5.1.3	码分多址接入	92
5.2	动态分配方案	92
5.2.1	随机多址接入	92
5.2.2	调度多址接入	100
5.2.3	混合方案	103
习题		106
第 6 章	图论与路由	108
6.1	图论概述	108
6.2	图论基础	109
6.2.1	图的定义	109
6.2.2	图的相关概念	110

6.2.3 图的矩阵表示	113
6.2.4 独立集与覆盖	115
6.3 图的最小生成树问题	116
6.3.1 树的概念与性质	116
6.3.2 图的生成树及其求法	116
6.4 图的最短路径问题和选择算法	121
6.4.1 Dijkstra 算法	122
6.4.2 F 算法	124
6.4.3 第 K 条最短路径选择问题	126
6.5 图论在网络流量分配中的应用	126
6.5.1 网络链路竞争分析	126
6.5.2 网络流量分配	130
习题	130
第 7 章 流量控制和拥塞控制	133
7.1 流量控制	133
7.1.1 流量控制概述	133
7.1.2 流量控制方法	135
7.2 网络最大流算法	141
7.2.1 最大流问题基本概念和定理	141
7.2.2 Ford-Fulkerson 算法	145
7.2.3 最短增广路算法	147
7.2.4 预流推进算法	149
7.3 最佳流问题	151
7.4 拥塞控制原理	153
7.4.1 拥塞和拥塞原因分析	153
7.4.2 拥塞控制基本原理	154
7.4.3 防拥塞策略	155
7.5 拥塞控制算法	156
7.5.1 拥塞控制一般方法	156
7.5.2 拥塞控制算法	157
习题	159
第 8 章 网络性能分析与仿真	161
8.1 引言	161
8.2 无线网络容量分析基础	163
8.2.1 协议干扰模型与物理干扰模型	163
8.2.2 任意网络与随机网络	164
8.2.3 无线网络中的排队模型	165
8.3 无线网络提供服务质量的方法	167

8.3.1	服务质量定义	167
8.3.2	QoS 模型	168
8.3.3	无线网络提供服务质量的方法	172
8.4	网络可靠性分析	174
8.4.1	可靠性定义及相关概念	174
8.4.2	复杂系统的可靠性计算	175
8.5	网络性能仿真软件	177
8.5.1	网络性能仿真方法	177
8.5.2	网络仿真软件介绍	178
8.5.3	OPNET	178
8.5.4	NS	181
8.5.5	其他仿真软件	183
	习题	185
第 9 章	通信网络理论在无线自组织网络中的应用	187
9.1	自组织网络特点及体系结构	187
9.1.1	自组织网络特点	188
9.1.2	自组织网络体系架构	188
9.2	IEEE 802.11 DCF MAC 协议	189
9.3	自组织网络路由协议	193
9.3.1	平面结构的路由协议	194
9.3.2	分簇结构的路由协议	207
9.3.3	地理信息辅助的路由协议	209
9.4	自组织网络服务质量	210
9.4.1	无线自组织网络的 QoS 信令模型	210
9.4.2	在 MAC 层区分服务的方案	214
9.4.3	QoS 路由	217
9.5	自组织网络的安全性分析	218
9.5.1	Ad Hoc 网络面临的安全威胁	218
9.5.2	Ad Hoc 网络路由协议攻击	219
9.5.3	战场环境下 Ad Hoc 网络的安全需求	220
	习题	220
	参考文献	223

第1章 概 述

随着通信的普及,通信网正朝着泛在化、移动化、多媒体化、宽带化和智能化的方向发展。通信网的快速发展对通信网络理论提出了迫切的发展需求,目前通信网络理论已经成为一门独立的学科,其学科内涵丰富、发展前景广阔。通信网络理论对于通信网的设计、规划、建设、管理和维护等具有重要的指导意义。

本章首先介绍通信网的基本构成与分类,然后讨论通信网体系结构和网络协议,最后分析通信网的性能指标和基本理论问题。

1.1 通信网的构成与分类

1.1.1 通信网的基本构成

通信网是由一定数量的节点(包括终端节点、交换节点或转发节点等)和连接这些节点的传输链路有机地组织在一起,按约定的信令或协议完成网络内任意用户间信息交换的通信系统。也就是说,通信网是由相互依存、相互制约的许多要素组成的有机整体,用以完成规定的功能。在通信网中,信息的交换可以在用户之间进行,也可以在设备之间进行,还可以在用户和设备之间进行。交换的信息包括用户信息(如语音、数据、图像、视频等)、控制信息(如信令信息、路由信息、测控信息等)和网络管理信息等。

通信网是一个由软件和硬件按特定方式构成的通信系统,每一次通信都需要软硬件的协调配合来完成。软件主要包括信令、协议、控制、管理、计费等单元,主要作用是完成通信网的控制、管理、运营和维护。硬件主要包括终端设备、交换设备、业务节点和传输系统,它们完成通信网的接入、交换、控制和传输等功能。这些硬件设施的定义和功能如下。

1. 终端设备

终端设备是指用户与通信网之间的接口设备,包括信源、信宿,以及变换器和反变换器的一部分。最常见的终端设备有固网电话机、移动网电话机、传真机、打印机、计算机、机顶盒、可视电话终端、视频终端和智能终端等。终端设备的功能如下。

(1)将待传送的信号和传输链路上传送的信号进行相互转换。在发送端,将信源产生的信号转换成适合在传输链路上传送的信号;在接收端则将从链路上接收的信号转换为信宿要接收的信号。

(2)将信号与传输链路相匹配,由信号处理设备完成。

(3)信令的产生和识别。即产生和识别网内所需的信令,以实现呼叫建立、监控、拆除、网络管理等一系列通信控制功能。

2. 交换设备

交换设备的基本功能是负责集中、转发终端节点产生的用户信息,或转发其他交换节点需要转接的信息,实现一个呼叫终端(用户)和它所要求的另一个或多个用户终端之间的交换连接。常见的交换设备有电话交换机、分组交换机、路由器、转发器等。以电话交换机为例,交换设备的主要功能如下。

- (1) 用户业务的集中和转发: 由各类用户接口和中继接口完成。
- (2) 交换功能: 由交换矩阵完成任意入线到出线的信息交换。
- (3) 信令功能: 负责呼叫控制和连接的建立、监视、释放等。
- (4) 控制功能: 路由信息的更新和维护,计费、话务统计、维护管理等。

3. 业务节点

业务节点是提供业务的实体,通常由连接到通信网络边缘的计算机系统构成,向用户提供信息查询与检索、电子邮件以及流媒体播放等服务。电话网中的智能查号、语音信箱,智能网中的业务控制点、智能外设,以及 Internet 上的各种服务器等都是业务节点。业务节点的主要功能如下。

- (1) 实现独立于交换节点的业务执行和控制。
- (2) 提供服务时可实现对交换节点呼叫建立的控制。
- (3) 为用户提供智能化、个性化、有差异的服务。

4. 传输系统

传输系统即传输链路,是信息的传输通道,是连接网络节点的媒介。一般包括信道与变换器、反变换器的一部分。传输链路可以分为不同的类型,不同类型的传输链路有不同的实现方式和适用范围。

通常传输系统的硬件包括线路接口设备、传输媒介、交叉连接设备等。传输系统的一个主要设计内容就是如何提高物理线路的使用效率,因此传输系统通常会采用多路复用技术,如频分复用、时分复用、码分复用、空分复用、波分复用等。

另外,为保证交换节点能正确接收和识别传输系统的数据流,交换节点必须与传输系统协调一致,包括保持帧同步和位同步、遵守相同的传输体制等。

1.1.2 通信网的分类

通信网可以有不同的分类方式,通常是按照提供的业务、功能、覆盖范围等对通信网进行分类。下面介绍几种常用的分类方式。

(1) 按照承载的业务类型来分,通信网可以分为固定电话通信网、移动电话通信网、传真通信网、数据通信网、计算机通信网、广播电视网、多媒体通信网和综合业务通信网等。所谓“三网融合”中的三网指的就是电信网、计算机网和有线电视网,也是按照承载的业务来分类的。对于综合业务网络就不能按照承载的业务来分类。

(2) 按照提供的功能来分,通信网可以分为传输网、交换网、接入网、信令网、同步

网和管理网等。

(3) 按照通信覆盖范围来分, 通信网可以分为广域网(Wide Area Network, WAN)、城域网(Metropolitan Area Network, MAN)、局域网(Local Area Network, LAN)和个域网(Personal Area Network, PAN)等。

广域网通常覆盖范围从几十到几千公里, 能连接多个城市或国家, 并能提供远距离通信。广域网的通信子网通常采用分组交换技术, 可以利用公用分组交换网、卫星通信网和无线分组交换网。

城域网通常覆盖一个城市或一个大学校园, 由于有密集的接入点和交换/路由点, 城域网采用的技术也相对复杂一些。城域网可分为核心层、汇聚层和接入层。核心层主要提供宽带业务承载和传输, 完成与已有网络的互联互通; 汇聚层的基本功能是汇聚接入层的用户流量, 进行数据分组传输的汇聚、转发和交换; 接入层利用多种接入技术, 进行带宽和业务的分配, 实现用户的接入。

局域网是指在某一区域内由多个终端互联成的通信网。一般覆盖范围在几千米以内。从严格意义上说, 局域网是封闭型的, 局域网的主要技术要素是网络拓扑、传输介质和介质访问控制方法。

个域网主要用于同一地点的各种通信终端之间的联网。若采用无线连接方式, 则称为无线个域网(WPAN)。WPAN的特点是覆盖范围小(一般半径在10米以内)、业务类型丰富、运行于允许的无线频段。涉及的关键技术主要有蓝牙技术、超宽带(UWB)技术、Zigbee技术和RFID技术等。

(4) 按通信的传输媒介来分, 通信网可以分为电缆通信网、光纤通信网、短波通信网、微波通信网、卫星通信网等。

(5) 按通信传输处理信号的形式进行分类, 可以分为模拟通信网和数字通信网等。

(6) 按通信服务的对象进行分类, 可以分为公用通信网、专用通信网等。专用网是一些特殊行业或面向特殊应用而专门建立的网络, 如银行系统通常就有自己的专用网。也可以通过公共网络搭建虚拟专用网(VPN)。

(7) 按通信的活动方式进行分类, 可以分为固定通信网和移动通信网等。

1.2 通信网体系结构与网络协议

1.2.1 通信网体系结构

1. 网络体系结构定义

网络体系结构是一套顶层的设计标准, 这套标准用来指导网络的技术设计, 特别是协议和算法的工程设计。它包括以下两个层次。

(1) 网络的构建原则, 本层次确定网络的基本框架。

(2) 功能分解和系统的模块化, 本层次给出实现网络体系结构的方法。

具体包括以下方面。

(1) 网络状态的维护和转移。

(2) 网络中的实体命名规则。

(3) 命名、寻址和路由功能的内在关系及工作原理。

(4) 通信功能的模块化划分。

(5) 信息流之间的网络资源分配, 网络终端系统与这种“分配”法则的相互作用, 公平性和拥塞控制的实现。

(6) 网络安全的实现和保证。

(7) 网络管理功能的设计与实现。

(8) 不同 QoS 的实现方法。

根据以上定义, 通信网的网络体系结构必须完成以下三项具体工作。

(1) 按一定规则把网络划分成为许多部分, 并明确每一部分所包含的内容。

(2) 建立参考模型, 将各部分组合成通信网, 并明确各部分间的参考点。

(3) 设置标准化接口, 对参考点的接口标准化。接口标准化的实质就是从整体上使通信网最优化。但局部可能暂时出现一些问题, 如成本上升、处理信息量增加, 并导致性能下降。一旦硬件实现了大规模集成化和高速化, 这些问题都会迎刃而解。

2. 网络的分层和分段

通信网采用分层结构、通信协议和分组交换方式实现了远程网络通信。任意一个网络可以从垂直方向分解为若干独立的层。网络采用分层结构具有以下好处。

(1) **各层相互独立。**某一层并不需要知道它下面的层是如何实现的, 而仅仅需要知道该层通过层间接口所提供的服务即可。因此, 各层均可以采用最合适的技术来实现。

(2) **灵活性好。**当任何一层发生变化时, 只要接口关系保持不变, 上下相邻层则均不受影响。而且, 某层提供的服务可以修改, 如果某层提供的服务不再需要, 可取消这一层。

(3) **实现和维护方便。**分层结构通过把整个系统分解成若干个易于处理的部分, 从而使通信网的实现、调试和维护等变得容易。

网络分层后, 每一层仍然很复杂。为了便于管理, 在分层的基础上, 再从水平方向把每一层网络划分为若干个分离的部分, 这就是分段。采用分段概念的重要特点是允许层网络的一部分被层网络的其余部分看成一个单独实体。因而, 层网络的内部结构是隐藏不露的, 这对于减少层网络管理控制的复杂性十分有利, 使网络运营可以自由地改变其子网或使其最佳化, 而不影响层网络的其余部分。

采用分段的概念对于在同一层网络内对网络结构进行规定是十分必要的。例如, 当同一层网络由不同网络运营商联合提供端到端通道时, 采用分段概念可以对管理界限进行规定。通信网协议是网络体系结构的重要组成部分, 它通常按照网络体系结构来设计。

1.2.2 网络协议及其功能

在通信网络中, 双方进行通信时都必须认同一套用于信息交换的约定规则。协议就是约定规则使用的语言及其所表达的语义。协议要规定信息格式及每条信息所需控制信息的一套规则, 实现这些规则的软件称为协议软件。单个网络协议可以是简单的, 也可

以是复杂的。概括起来,在现代通信中,要做到有条不紊地交换信息,每个节点都必须遵守一些事先确定的规则。这些规则明确了通信中同步、时序、错误检测和纠正等所有的相关细节。这些为网络信息交换而建立的规则、标准或约定就称为协议。一个通信网络的协议主要由下面三个要素组成。

(1)语法:信息与控制信息的结构或格式。

(2)语义:需要发出何种控制信息、完成何种动作,以及做出何种应答。

(3)同步:事件实现的详细说明及严格的同一时刻通信问题。

通信协议具有的主要功能有分段和组装、封装、连接控制、流量控制、差错控制、寻址、复用及附加服务。下面对这些功能分别予以简单介绍。

1) 分段和组装

在应用层将转移数据的逻辑单元称为消息,应用实体之间以消息的形式或以连续数据流的形式发送数据,较低层的协议需要把数据块分为较小的、长度受限的数据块,这个过程称为分段。通常把两实体之间按照协议交换的数据块称为协议数据单元(Protocol Data Unit, PDU),在接收端重新把数据组装成消息。

对数据流进行分段也会带来不利的影响,主要有以下几点。

(1)每个 PDU 包含一定量的控制信息,因此数据单元的长度越小,控制信息的比特数在整个数据单元的比特数中占的比例越大,从而降低了传输效率。

(2)PDU 的到达会引起处理机的一个中断,数据单元越小,引起的中断就越多。

(3)PDU 的长度越小,处理同一数据块所需要的时间越长。

协议设计者在确定数据单元长度的过程中必须综合考虑上述诸多因素。分段的逆过程是组装,在接收端,分段形成的数据块必须被组装成消息,对于不按照次序的数据块,则需要重新排序后再进行组装。

2) 封装

每个协议数据单元不仅包含数据,而且还包含控制信息。有时某些 PDU 只包含控制信息而没有数据,其中的控制信息主要包含以下三个部分。

(1)地址:指出发送端或接收端的地址。

(2)错误检测码:包含某种校验序列,对收到的一段信息进行校验。

(3)协议控制:对流量和差错进行控制的信息。

在分段后形成的数据块上增加控制信息的过程称为封装,这是协议需要完成的功能之一,当存在多层协议时,需要按层次进行封装。

3) 连接控制

数据通信分为无连接和面向连接两种传送方式。在无连接的方式中,每个 PDU 在传送的过程中进行独立处理;在面向连接的方式中,在两个实体之间建立一个逻辑联系称为连接,PDU 通过建立的连接有序传送。面向连接的通信过程可以分为连接建立、数据传送、连接拆除三个阶段。面向连接的数据传送一个重要特征是序号利用,对于 PDU 的发送均按照预定的序号进行,发送和接收实体根据传送的序号可以支持流量控制、差错控制和数据单元的组装等功能。

4) 流量控制

流量控制是指接收实体对发送实体送出的数据单元数量或速率进行限制。流量控制的最简单形式是停止等待程序。在整个程序中,发送实体必须在收到已经发送的一个 PDU 的确认信息后,才能再发送下一个新的 PDU。更有效的协议是向发送实体设置一个发送单元的限制值,这一数值规定了在没有收到确认信息之前,允许发送实体送出的数据单元的最大值。这就是广泛应用的滑动窗口控制。

为了更有效地对流量进行控制,流量控制协议可以设置在协议不同的层次上。

5) 差错控制

通信协议的另一个重要功能是差错控制,差错控制技术是用来对 PDU 中的数据和控制信息进行保护的。差错控制技术的实现大多是用校验序列进行校验,在出错的情况下对整个 PDU 重新传输。另一方面,重新传输还受到定时器的控制,超过一定的时间没有收到确认信号则重新传输。和流量控制一样,差错控制在系统的各个部分进行,例如在网络接入部分即终端和网络之间进行,以保证在终端和网络之间对数据单元的准确接收。然而数据单元也可能在网络的内部丢失和出错,因此需要端到端的协议来对网络内部的错误予以纠正。

6) 寻址

在通信系统中,寻址是一个复杂的过程,和多方面的因素有关,寻址的过程涉及寻址的级别、寻址的范围、连接识别符和识别的模式几个方面。在 TCP/IP 网络结构中寻址是协议的一个基本功能,通过寻址保证把数据单元送到准确的目的地。在 OSI 体系结构和其他通信结构中,寻址同样是协议的一项重要功能。

寻址和通信协议的层次有关,不同的层次有相应的地址和寻址的方法。对通信子网的寻址是网络级寻址,这时地址和每一个终端系统(主机或终端)有关,也和每一个中间系统(路由器或交换机)有关,这样的地址是一个网络级的地址。

寻址的另一个问题是寻址的范围,地址是一个整体地址,整体地址有以下特性。

(1) 整体的单一性。一个整体地址识别一个唯一的系统,因此一个系统可以用一个整体地址来表示。

(2) 整体的应用性。任何一个系统都可以利用其他系统的地址去识别该系统。

利用上述的两项特征,在互联网中可以通过对数据单元选路,从一个系统去访问任何一个其他系统。

链接识别符的应用具有如下优点:减小开销、选路、复用和状态信息的利用。寻址中的另一个概念是寻址的模式,它可以分为单播、组播和广播。

7) 复用

和寻址相关的是复用,复用是指在一个系统中支持多个连接,例如在 X.25 协议中多条虚电路可以构建在一个端系统中,也就是说这些虚电路复用 in 端系统和网络之间的接口上。复用也可以利用端口号实现,在两个端系统之间建立多个连接,例如多个 TCP 连接可以建立在一个给定的系统上,并且一个 TCP 连接支持多个端口。

8) 附加服务

协议也可以对通信实体提供以下各种附加服务。

(1) 优先权。某些消息,例如控制信息,需要以最短的时延到达目的地,这时需要对这些消息分配优先权,也可以按照连接或按照 PDU 来分配优先权。

(2) 服务等级。对网络的服务质量指标提出要求,如对时间延迟、吞吐量等设置门限值。

(3) 安全。设置口令权限,以保护系统的安全。

某一层次的协议不一定具有上述所有的功能,然而不同层次的协议可以具有相同类型的功能。以上概括通信协议的基本功能,协议所具有的功能也是通信系统的基本功能,因此协议的基本功能的确定、层次的划分、通过硬件或软件对协议基本功能的实现,在通信系统的设计和开发中具有举足轻重的作用。

对所有通信的完整细节,设计人员不可能设计一个单一、巨大的协议,而是把通信问题划分成多个相对独立的问题,然后为每个问题设计一个单独的协议(称为协议子集)。这样,使用的协议子集形成了协议系列,从而使得每个协议的设计、分析、实现和测试变得简单,并增加了灵活性。

协议设计和开发成完整的协议集合称为协议栈(也称协议组或协议簇)。协议栈中的每个协议解决一部分通信问题,这些协议合起来解决了整个通信问题,而且整个协议栈中的各个协议之间能高效地相互作用。为确保可靠且高效率的通信,必须仔细准确地划分单独协议,确保每个协议需要处理的通信问题不会重复。但是为了更有效地实现协议,协议之间应能共享数据结构和信息。而且,这个协议系列应能处理所有可能的硬件错误或其他异常情况。每个协议栈是独立开发的,一个给定的协议栈不能同另一个协议栈协作。

1.3 通信网的服务质量和性能指标

通信网的服务质量是网络设计者、运营商和用户共同关心的问题,评价通信网的服务质量要建立一套性能指标。不同业务的服务质量要求不同,评价的指标参数也不同。

1.3.1 通信网的服务质量

通信网的服务质量一般通过接通的任意性与快速性、信息传输的透明性与一致性,以及网络的可靠性与经济合理性等方面来衡量。

1. 接通的任意性与快速性

接通的任意性与快速性是对通信网的基本要求,也称为可访问性。所谓接通的任意性与快速性是指通信网内的任意一个合法用户能快速接入通信网中以获得信息服务,并具备在规定的时延限制下传递信息的能力。如果有些用户不能与其他一些用户通信,则可能这些用户不在同一个网内或网内出现了问题;用户如果不能快速接通到网络,则可能会使要传送的信息失去价值,这种接通将是无效的。影响接通的任意性和快速性的主要因素有:网络的拓扑结构、网络的可用资源以及网络设备的可靠性。不合理的拓扑结构会导致转接次数过多、阻塞率上升、时延增大;网络资源不足的后果是增大阻塞概率;

网络设备的可靠性降低会造成传输链路或交换设备出现故障，甚至丧失其应有的功能。

2. 信息传输的透明性与传输质量的一致性

所谓透明，是指在规定业务范围内的所有信息都可以在网内传输，对用户不加任何限制。一般来说，透明性要求在目前的技术下，对用户提出尽可能少的限制，因为对用户的限制，也就是对网络发展的限制。传输质量的一致性是指网内任何两个用户通信时，不论这两个用户的远近，应具有相同或相仿的传输质量，而与用户之间的距离无关。通信网的传输质量直接影响通信的效果。因此要制定传输质量标准并进行合理分配，使网中的各部分均满足传输质量指标的要求。实际应用中常用的评价指标有用户满意度和信号传输质量等。

3. 网络的可靠性与经济合理性

可靠性对通信网来说至关重要，一个不可靠的或经常中断的网络是不能用的。但绝对可靠的网络也是不存在的，通信网络的可靠性设计不能追求绝对可靠。所谓可靠性是指整个通信网连续、不间断地稳定运行的能力，主要的评价指标有以下几种。

(1) 失效率：网络在单位时间内发生故障的概率，一般用 λ 表示。

(2) 平均故障间隔时间 (MTBF)：相邻两个故障间的时间的平均值。MTBF 是失效率的倒数，即 $MTBF=1/\lambda$ 。

(3) 平均修复时间 (MTTR)：修复一个故障的平均处理时间，通常用 μ 表示修复率， $MTTR=1/\mu$ 。

(4) 系统不可利用度 (U)：在规定的-一个时间和条件内系统丧失规定功能的概率。通常假设系统平稳运行时， μ 和 λ 都接近于常数，则 U 为

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} \quad (1.1)$$

网络的经济合理性和用户的要求有关，一个通信网的投资常常分阶段进行，以便达到最大的经济效益。每一个阶段网络容量的建设与需求的预测有密切的关系，建多了设备闲置造成经济损失，建少了不能满足要求而且丧失了产生经济效益的机会，二者都是不合理的。由此可见，建设一个网络要做到经济上的合理，既很复杂又很重要。

1.3.2 通信网的性能指标

为了使通信网能快速、有效、可靠地传递信息，必须提出一系列性能指标对一个新建或已经存在的通信网进行评价，以判断其是否合理以及需要在哪些方面进行改进。通信网络主要的性能指标包括网络容量、对业务服务质量的支持能力和可靠性等。其中，网络容量描述的是网络的最大承载能力；网络对业务服务质量的支持能力又可细化为网络吞吐量、端到端时延以及延时抖动等具体指标；可靠性主要包括网络的故障概率（如丢包率、中断概率等量化指标）和故障修复概率等。

1. 网络容量

从网络信息论的角度考虑的网络容量融合了网络层、传输层和物理层的特点,此次观察网络的整体特性。容量估计理论对于优化网络部署、提高网络效率、增强网络业务保障能力具有重要的理论价值。目前针对广播信道和多址信道的容量分析已经取得了一定的成果。随着分布式、自组织无线网络的迅猛发展,对无线信道容量的估计开始转向对网络容量估计方面的研究。无线自组织网中的不确定因素增加了容量分析问题的复杂度:一方面无线网信道属于竞争信道,移动节点拓扑动态性较强,个别节点位置的变化可能会显著影响网络容量;另一方面,分布式环境下节点之间协同计算行为较为复杂,使无线自组织环境下网络容量估计理论遇到了前所未有的挑战。

2. 吞吐量

吞吐量是指单位时间内某个节点发送和接收的数据量,单位一般是比特每秒(bit per second, bps)。

3. 端到端时延

端到端时延(End-to-end Delay)是指IP数据包从离开源点时算起一直到抵达终点时为止一共经历了多长时间的时延。计算公式如下:

$$\text{端到端时延} = \text{数据包的接收时间} - \text{数据包的发送时间}$$

4. 丢包率

丢包率(Packet Loss Rate)是指测试中所丢失的数据包数量与所发送的数据包数量的比值,通常在吞吐量范围内测试。丢包率与数据包长度以及数据包发送的频率相关。通常,千兆网卡在流量大于200Mbps时,丢包率小于万分之五;百兆网卡在流量大于60Mbps时,丢包率小于万分之一。

5. 抖动率

抖动率是网络延迟的变化量,它是由同一应用的任意两个相邻数据包在传输路由中经过网络延迟而产生的。抖动率由相邻数据包延迟时间差除以数据包序号差得到。计算公式如下:

$$\text{抖动率} = \frac{(\text{数据包 } P[j] \text{ 的时延} - \text{数据包 } P[i] \text{ 的时延})}{(\text{数据包 } P[j] \text{ 的序号 } j - \text{数据包 } P[i] \text{ 的序号 } i)}$$

数据包 $P[j]$ 的时延 = 数据包 $P[j]$ 的接收时间 - 数据包 $P[j]$ 的发送时间

数据包 $P[i]$ 的时延 = 数据包 $P[i]$ 的接收时间 - 数据包 $P[i]$ 的发送时间

1.4 通信网的基本理论问题

随着网络通信技术的进步,通信网络逐步发展扩张,已经变得无处不在。那么网络