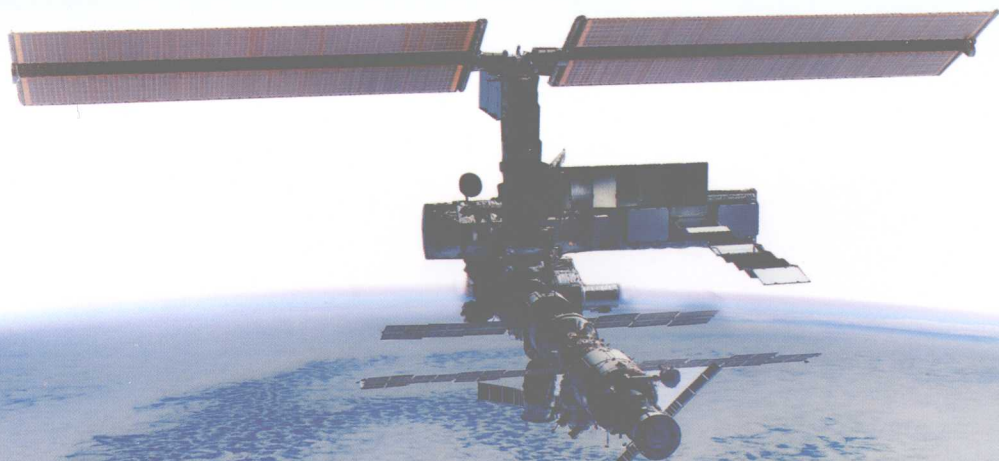


面向21世纪高等院校教材

现代通信技术

(第2版)

张敬堂 主编 赵泽兵 翟燕 李铁峰 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

面向 21 世纪高等院校教材

现代通信技术

(第 2 版)

张敬堂 主编

赵泽兵 翟燕 李铁峰 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书着重介绍了现代通信领域中涉及的主要技术问题,重点是近年来涌现的新技术。主要内容包括现代短波与超短波通信技术、数字移动通信技术、卫星通信技术、光纤通信技术及数据通信与数据通信网技术等。

全书在选材上突出了通信领域中的新技术和最新应用系统,在编写上力求简明扼要、深入浅出;注重了对内容的提炼,避免了抽象的理论表述和复杂的公式推导;强调了基本概念和基本原理。每章均配有适量的习题与思考题。

本书以应用技术为主,特别注重最新的技术成果,有一定的深度和广度。在内容上力求科学性、先进性、系统性与实用性。各章相互联系,在论述上又有相对的独立性和完整性。

本书可作为高等院校大学本科相关专业高年级学生的教材或参考书,也可作为相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信技术 / 张敬堂主编. —2 版. —北京: 国防工业出版社, 2008. 6

面向 21 世纪高等院校教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 05699 - 0

I. 现... II. 张... III. 通信技术—高等学校—教材
IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 059333 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 25 1/4 字数 586 千字

2008 年 6 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

通信技术融入计算机技术和数字信号处理技术后发生了革命性的变化,是未来信息社会的支柱。通信技术与计算机技术伴随着信息产业的蓬勃发展,使世界进入了信息时代,而信息社会又促使着信息高新技术不断涌现,同时也迫使人们不懈地去学习和掌握现代通信知识和技术。高校学生、工程技术人员应能适应这一巨大变化,承担向信息化社会过渡的任务。这迫切要求他们除了掌握坚实的理论基础外,还应具有更宽广的知识和强烈的创新意识,能掌握通信领域的新技术、新成就,了解通信技术的发展动向。本书的目的是力图通过介绍现代通信领域中涉及的主要技术,使读者对通信领域中的新技术概貌、关键技术、发展趋势有一个基本了解。

全书共分6章。第1章绪论,主要介绍现代通信的基本概念、现代通信的基本技术、现代通信网的技术基础和现代通信技术的发展趋势;第2章现代短波与超短波通信技术,主要介绍短波与超短波通信的概念、传输特性与特点、现代短波与超短波通信技术、现代短波通信网技术以及现代短波与超短波通信技术的发展趋势;第3章数字移动通信技术,主要介绍数字移动通信的概念与组成、数字移动通信的基本技术、GSM与Q-CDMA等具体移动通信技术、第三代移动通信技术、第四代移动通信技术以及数字移动通信技术的发展趋势;第4章卫星通信技术,重点讨论卫星通信的概念、组成与特点、卫星通信的基本技术、VSAT卫星通信技术、国际卫星通信技术和卫星通信技术的发展趋势;第5章光纤通信技术,主要介绍光纤通信技术概念、传输设备、传输体制、光纤通信网络以及光纤通信新技术;第6章数据通信与数据通信网技术,重点讨论数据通信与数据通信网的概念和特点、数据通信与数据通信网的基本技术以及数据通信与数据通信网技术的发展趋势。

本书由张敬堂主编。第1、2、5章由张敬堂编写,第3章由赵泽兵和翟燕编写,第4章由张敬堂和李铁峰编写,第6章由翟燕编写,全书由张敬堂统稿。

本书在编写过程中,得到了信息工程大学信息工程学院训练部的大力支持,通信工程系罗小武教授给予了很多指导和帮助,在此表示衷心的感谢。此外,本书的编写参考了大量的国内外专业书籍和文献,这些书籍和文献绝大部分均已在书后的参考文献中列出,在此向各位原作者表示深深的谢意。

本书是在第1版的基础上重新编写,并紧紧围绕现代通信技术的最新发展,对部分章节进行了较为细致的修改,增加或删减了部分内容。

书中的许多论述包含了个人的看法和思考。由于现代通信新技术发展非常迅猛,加上编者水平有限,书中错误和遗漏在所难免,敬请广大读者和同行不吝赐教。

编 者

2008年3月于解放军信息工程大学

目 录

第1章 绪论	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 通信的模型	1
1.1.2 通信的分类	3
1.1.3 通信方式	3
1.1.4 传输技术	4
1.1.5 信息与信息的度量	5
1.1.6 主要性能指标	8
1.2 现代通信的基本技术	10
1.2.1 信源编码与译码技术	10
1.2.2 信道编码与译码技术	16
1.2.3 调制与解调技术	20
1.2.4 多址技术	27
1.2.5 抗干扰技术	31
1.3 现代通信网的技术基础	38
1.3.1 现代通信网的体系结构	38
1.3.2 交换技术	40
1.3.3 数据报与虚电路	42
1.3.4 路由选择	44
1.3.5 流量控制	45
1.3.6 帧中继	45
1.4 现代通信技术的发展趋势	46
习题与思考题	47
第2章 现代短波与超短波通信技术	49
2.1 短波与超短波通信概述	49
2.1.1 短波与超短波通信的概念	49
2.1.2 短波与超短波通信的特点	49
2.1.3 短波与超短波的传播特性	50
2.1.4 信道的噪声与干扰	57
2.2 现代短波与超短波通信技术	58
2.2.1 短波与超短波通信中的调制技术	58
2.2.2 数据传输的相关技术	65

121	2.2.3 高频自适应通信技术	70
121	2.2.4 短波自适应电台组网技术	77
121	2.2.5 超短波跳频电台组网技术	78
120	2.3 现代短波通信网技术	81
121	2.3.1 短波自适应通信网技术	81
121	2.3.2 短波跳频通信网技术	95
121	2.3.3 现代短波通信网的安全性	100
121	2.4 现代短波与超短波通信技术的发展趋势	101
121	习题与思考题	103
	第3章 数字移动通信技术	105
121	3.1 移动通信概述	105
121	3.1.1 移动通信的基本概念	105
121	3.1.2 移动通信的特点	106
121	3.1.3 蜂窝移动通信系统的组成	107
121	3.1.4 移动通信的发展历程	108
121	3.2 数字移动通信的基本技术	109
121	3.2.1 蜂窝组网技术	109
121	3.2.2 移动通信中的多址技术	117
121	3.2.3 移动通信中的语音编码技术	122
121	3.2.4 移动通信中的数字调制技术	124
121	3.2.5 交织技术	125
121	3.2.6 移动通信中的分集技术	126
121	3.3 GSM 数字蜂窝移动通信技术	127
121	3.3.1 GSM 系统的网络结构	128
121	3.3.2 GSM 系统的无线接口	131
121	3.3.3 GSM 系统的信道	133
121	3.3.4 GSM 系统号码与识别	134
121	3.3.5 GSM 系统的安全性管理	136
121	3.3.6 GSM 移动用户的接续过程	138
121	3.3.7 GSM 系统的移动性管理	139
121	3.3.8 DCS1800 系统简介	140
121	3.4 Q-CDMA (IS-95) 数字蜂窝移动通信技术	141
121	3.4.1 CDMA 系统的网络结构	141
121	3.4.2 CDMA 系统中的扩频码与地址码	142
121	3.4.3 CDMA 系统中的频谱与信道配置	144
121	3.4.4 正向 CDMA 信道	145
121	3.4.5 反向 CDMA 信道	148
121	3.4.6 CDMA 系统的功率控制	149
121	3.4.7 CDMA 系统的安全性管理	150

057	3.4.8	CDMA 系统的移动性管理	151
77	3.4.9	CDMA 系统的呼叫处理	153
85	3.5	第三代移动通信技术	156
18	3.5.1	第三代移动通信系统概述	156
18	3.5.2	第三代移动通信的新技术	168
29	3.6	第四代移动通信技术	174
001	3.6.1	第四代移动通信系统概述	174
101	3.6.2	第四代移动通信的关键技术	178
801	3.7	数字移动通信技术的发展趋势	182
201		习题与思考题	185
	第4章	卫星通信技术	187
201	4.1	卫星通信概况	187
801	4.1.1	卫星通信的基本概念	187
701	4.1.2	卫星通信的发展过程	188
801	4.1.3	卫星通信系统的组成	189
901	4.1.4	卫星通信的轨道和工作频段	192
001	4.1.5	卫星通信的分类	193
711	4.1.6	卫星通信的特点	194
851	4.2	卫星通信的基本技术	195
451	4.2.1	卫星通信中的语音压缩编码技术	195
251	4.2.2	卫星通信中的数字信号调制技术	202
051	4.2.3	卫星通信中的差错控制技术与扰码技术	204
751	4.2.4	数字复接技术	207
851	4.2.5	卫星通信多址连接方式和信道分配技术	208
181	4.2.6	卫星通信中的多址技术	212
881	4.3	VSAT 卫星通信技术	220
481	4.3.1	VSAT 卫星通信概述	220
181	4.3.2	VSAT 卫星通信网络结构	225
781	4.3.3	VSAT 网络的多址协议	229
081	4.3.4	VSAT 网络的发展趋势	234
040	4.4	国际通信卫星的通信技术	235
141	4.4.1	概述	235
141	4.4.2	国际通信卫星业务现状	237
541	4.4.3	国际通信卫星 IDR 技术	239
441	4.4.4	国际通信卫星 IBS 技术	243
241	4.4.5	国际通信卫星 TDMA 技术	246
841	4.4.6	国际通信卫星其他技术	250
041	4.4.7	国际通信卫星发展趋势	252
021	4.5	国际卫星移动通信技术	252

4.5.1	卫星移动通信系统的分类	253
4.5.2	卫星移动通信系统的特点和主要技术	254
4.5.3	卫星移动通信系统的组网技术	255
4.5.4	高/中/低轨道卫星移动通信系统	256
4.5.5	卫星移动通信系统展望	263
4.6	卫星通信技术的发展趋势	264
	习题与思考题	268
第5章	光纤通信技术	270
5.1	光纤通信概述	270
5.1.1	光纤通信的基本概念	270
5.1.2	基本光纤传输系统	271
5.1.3	光纤通信的主要特点	272
5.1.4	光纤通信的发展	274
5.2	光纤传输设备	275
5.2.1	光发送机	275
5.2.2	光接收机	277
5.2.3	线路编码	279
5.2.4	光中继器	280
5.3	数字光纤通信中的传输体制	281
5.3.1	引言	281
5.3.2	准同步数字系列 PDH	282
5.3.3	同步数字系列 SDH	285
5.3.4	SDH 网的同步和自愈	290
5.4	光纤通信网络	294
5.4.1	光纤通信网络的分类	294
5.4.2	光纤用户接入网	296
5.5	光纤通信新技术	301
5.5.1	光放大技术	301
5.5.2	相干光通信技术	304
5.5.3	多信道光纤通信技术	305
5.5.4	光孤子通信技术	311
5.5.5	光交换技术	312
5.5.6	波长变换技术	313
5.6	光纤通信技术的发展趋势	314
	习题与思考题	318
第6章	数据通信与数据通信网技术	320
6.1	数据通信与数据通信网概述	320
6.1.1	数据通信与数据通信网的概念	320
6.1.2	数据通信与数据通信网的特点	320

6.2	数据通信与数据通信网的基本技术	322
6.2.1	ATM 交换技术	322
6.2.2	接入网技术	340
6.2.3	IP 电话技术	361
6.2.4	IPv6 网络技术	381
6.3	数据通信与数据通信网技术的发展趋势	392
	习题与思考题	393
	参考文献	395

第1章 绪论

通信技术融入计算机技术和数字信号处理技术后发生了革命性的变化,它和计算机技术、数字信号处理技术相结合是现代通信技术的标志。通信技术、计算机技术和信号处理技术构成了信息科学的三大支柱。特别是现代通信技术,已在各个领域发挥着重要作用。通信作为信息传递的手段,已成为信息时代社会发展和经济活动的生命线。

本章主要介绍现代通信的基本概念、现代通信的基本技术、现代通信网的技术基础及现代通信技术的发展趋势。

1.1 基本概念

广义上讲,用任何方法,通过任何传输媒质将信息从一个地方传送到另一个地方,均可称为通信。通信的目的是为了进行消息的有效传递与交换。直到19世纪初,人们开始利用电信号传输消息。从1837年莫尔斯(F. B. Morse)发明电报算起,一个多世纪以来,通信的发展大致经历了三大阶段:以1837年发明电报(莫尔斯电码)为标志的通信初级阶段;以1948年香农(Shannon)提出的信息论开始的近代通信阶段;以20世纪70年代出现的光纤通信为代表的和以综合业务数字网迅速崛起为标志的现代通信阶段。光纤通信技术、卫星通信技术和移动通信技术形成现代通信技术的三大主要发展方向。

1.1.1 通信的模型

通信的任务是在信息源和收信者之间建立一个传输信息的通道,实现信息的传输。但是由于信息源与收信者之间的不确定性和多元性,一般在它们之间的信息传递方式不是固定的。实际上,基本的点对点通信,均是把发送端的信息通过某种信道传递到接收端。因而,可以把通信概括为一个统一的模型。这一模型包括信息源、发送设备、信道、接收设备、收信者和噪声源6个部分。模型框图如图1-1所示。

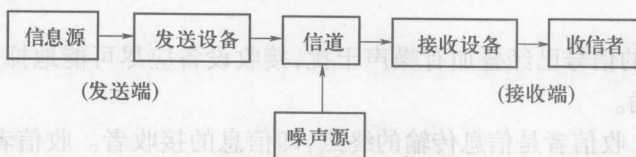


图 1-1 通信的模型

模型中各部分的功能如下:

(1) 信息源。信息源是指各种信息(如语音、文字、图像及数据等)的发出者,其作用是把各种可能消息转换成原始电信号。根据信息源输出信号的性质不同又可分为模拟信源和数字信源。模拟信源输出连续幅度的模拟信号,如电话机、电视摄像机等;数字信源



输出离散的数字信号,如电传机、计算机等数字终端设备。模拟信号和数字信号是可以相互转换的。

不同的信息源构成不同形式的通信系统。

(2) 发送设备。发送设备的基本功能是完成信息源与信道之间的匹配,即将信息源发出的信息变换成适合在信道中传输的信号。对于不同的信息源和不同的通信系统,发送设备有不同的组成和变换功能。

对于模拟通信系统,发送设备主要部分是调制器。

对于数字通信系统,发送设备又常常包含信源编码和信道编码两部分。信源编码的作用是提高数字信号的有效性,通常是指数据压缩(如语音压缩编码、图像数据压缩编码等);信道编码用于提高数据的纠错能力,降低误码率,提高传输的可靠性。

发送设备还包括为达到某些特殊要求所进行的各种处理,如多路复用、保密处理等。

另外,如果系统中不加调制器和解调器,称这样的系统为数字基带传输系统。如果系统中有调制器和解调器,则称这样的系统为数字频带传输系统。

(3) 信道。信道是信号传输媒介的总称。信道按传输介质的种类可以分为有线信道(如双绞线、电缆、同轴电缆、光纤等)和无线信道(如可以传输电磁信号的自由空间)。信道如果按传输信号的形式又可以分为模拟信道和数字信道。

在无线通信系统中,信道将受到如下损伤:

① 信道失真(distortion)。它表现为多径形式——同一接收信号的多个副本之间的构造性和破坏性干扰。

② 信道通常具有时变性(time-varying nature)。它由终端移动性或传播路径的条件变化引起。

③ 信道干扰(interference)。它由其输出信号与发送信号占据相同频带的其他信源偶然或有意产生。

④ 接收噪声(noise)。它是由接收设备前端的电子设备产生的。虽然该噪声由接收设备产生,但它通常可视为信道影响,因此也称为信道噪声。接收噪声的影响取决于接收信号的强度,因而它主要取决于接收设备和发送设备之间的传播路径。

(4) 接收设备。接收设备的功能有两方面。

① 对接收信号进行与发送设备相反的变换处理,以便恢复发送端信息源送出的信号。

② 由于接收的信号已经叠加有噪声干扰,接收设备应尽可能地抑制干扰,使所恢复的信号尽可能准确。

(5) 受信者。受信者是信息传输的终点,即信息的接收者。受信者可以与信息源相对应地构成一人通信或机—机通信,也可以与信息源不一致地构成一人—机通信或机—人通信。

(6) 噪声源。噪声源是指系统内各种干扰影响的等效结果,是信道中的噪声及分散在通信系统其他各处的噪声的集中表示。

以上所述的通信系统只能实现两用户间(点对点)的单向通信,要实现双向通信还需要另一个完全相反的通信系统来传送信息。如果两个方向有各自的信道(传输媒介),则



双方都可以独立进行发送和接收,但若共享一个信道(传输媒介),则必须用频率、时间或空间分割等办法来共享。

另外,通信也不只是点对点通信,大多情况下是多点之间的通信,以完成信息的传输与交换。为解决这个问题,就涉及到多址技术和交换技术等,整个通信系统就构成了一个通信网。

1.1.2 通信的分类

通信的种类繁多,它们的具体性质也各不相同。通信按不同形式可分成如下几类。

(1) 按所传送的信号形式可分为模拟通信和数字通信。

(2) 按传输媒质可分为有线通信和无线通信,如图1-2所示。

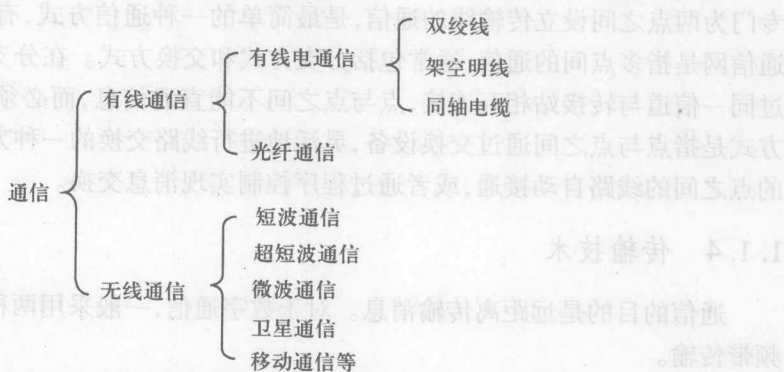


图1-2 按传输媒质分类

(3) 按通信工作频段可分为超长波通信、长波通信、中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信、毫米波通信、光通信等。

(4) 按通信的业务与内容可分为语音通信(电话)、传真、数据通信(图像通信、多媒体通信等)、无线寻呼、可视电话、电报等。

(5) 按受信者是否在运动中完成通信可分为移动通信和固定通信。

1.1.3 通信方式

从不同角度来考虑,通信方式常有以下几种。

1. 按消息传送的方向与时间关系分类

对于点与点之间的通信,按消息传送的方向与时间关系,通信方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信3种。

所谓单工通信,是指消息在任意时刻只能单方向进行传输的一种通信方式。例如广播、遥测、遥控等就是单工通信方式。

所谓半双工通信,是指通信双方都能收发消息,但不能同时进行收发的一种通信方式。例如,使用同一载频工作的无线电对讲机等就是按这种通信方式工作的。

所谓全双工通信,是指通信双方可同时进行收发消息的一种通信方式。例如,普通电话就是一种最常见的全双工通信方式。

显然,单工通信其信道是单向信道,而半双工通信与全双工通信都必须是双向信道。



2. 按数字信号码元排列方法不同分类

在数字通信中,按照数字信号码元排列方法不同,可将通信方式分为串行传输和并行传输两种方式。

所谓串行传输,是将代表信息的数字信号码元序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输。如果将代表信息的数字信号码元序列按某一规则分割成两路或两路以上的数字信号码元序列同时在信道中传输,则称为并行传输。

一般的远距离数字通信大都采用串行传输方式,因为这种方式只需占用一条通路。并行传输在近距离数字通信中有时也会遇到,它需要占用两条或两条以上的通路。

3. 按通信网络形式分类

按通信的网络形式不同,可将通信方式分为专线方式和通信网两类。专线方式是指专门为两点之间设立传输线的通信,是最简单的一种通信方式,有时简称为点对点通信;通信网是指多点间的通信,通常包括分支方式和交换方式。在分支方式中,每一个点都经过同一信道与转接站相互连接,点与点之间不能直通信息,而必须通过转接站转接;交换方式是指点与点之间通过交换设备,灵活地进行线路交换的一种方式,即把两个需要通信的点之间的线路自动接通,或者通过程序控制实现消息交换。

1.1.4 传输技术

通信的目的是远距离传输消息。对于数字通信,一般采用两种传输技术:基带传输和频带传输。

所谓基带传输,是指信号没有经过调制(没有进行频率变换)而直接送到信道上进行传输的一种方式。图1-3给出了一个数字基带传输通信系统的简单组成图。图中信息源为数字信号源,基带信号形成器仅对数字信号进行码型变换,而不进行频率变换。与基带传输相对应的是频带传输。

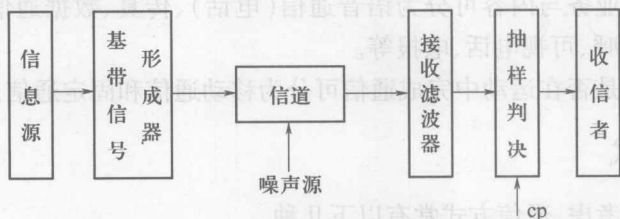


图1-3 数字基带传输通信系统的组成框图

所谓频带传输,是指信号在发端首先经调制(频率搬移)后,再送到信道中传输,收端则要进行相应的解调才能恢复原来的信号。图1-4给出了一个数字频带传输通信系统的组成框图。

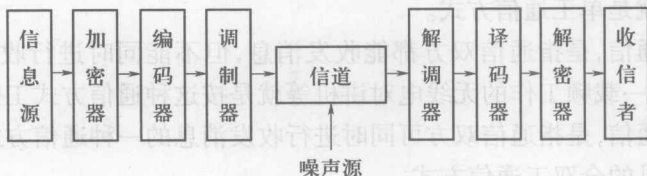


图1-4 数字频带传输通信系统的组成框图



1.1.5 信息与信息的度量

在通信系统中,形式上传输的是消息,但实际上传输的是信息。通信的目的是传输含有信息的消息。消息以信号作为载体,信息寄寓于消息之中。信息较抽象,而消息是较具体的。通信的结果是消除或部分消除不确定性从而获得信息。

为了便于对通信系统的性能做定量的分析,所以要对消息中所含的信息量进行度量。消息是多种多样的,因此信息的度量方法必须能够用来度量任何消息的信息量,而与消息种类无关。另外,消息中所含信息量的多少也应与消息的重要程度无关。

1. 消息中所含的信息量与概率的关系

在通信中,虽然消息的传递意味着信息的传递,但对于接收者而言,某些消息比另外一些消息包含的信息更多。例如,对接收者来说,一件事很平常,发生的可能性很大,那么他获得的消息价值就小;相反,另一件事极难发生,那么他获得的消息价值就大。这表明消息确实有量值的意义。可以看出,消息出现的可能性越小,则此消息中携带的信息量就越大。

概率论知识告诉我们,事件的不确定程度,可以用它出现的概率来描述。消息中的信息量与消息发生的概率密切相关。消息出现的概率越大,则所含信息量就越少。如果事件是必然的(概率为1),那么它传递的信息量就应该为0。如果事件是不可能的(概率为0),那么它有无穷的信息量。而且当我们得到一个不是由一个事件构成而是由若干个独立事件构成的消息,那么这时我们得到的总的信息量,就是若干个独立事件的信息量的总和。

综上所述,消息 x 中所含的信息量 I 与消息出现的概率 $p(x)$ 间的关系式应当反映如下规律。

(1) 消息中所含的信息量 I 是该消息出现的概率 $p(x)$ 的函数,即

$$I = I[p(x)], \text{ 且 } 0 \leq p(x) \leq 1 \quad (1-1)$$

(2) 消息出现的概率越大,它所含的信息量越小;反之信息量越大。且当 $p(x) = 1$ 时, $I = 0$ 。

(3) n 个相互独立事件构成的消息,所含信息量等于各独立事件信息量的和,即

$$I[p(x_1)p(x_2)\cdots p(x_n)] = I[p(x_1)] + I[p(x_2)] + \cdots + I[p(x_n)] \quad (1-2)$$

这样,可以得到 I 与 $p(x)$ 的关系式

$$I = \log_a \frac{1}{p(x)} = -\log_a p(x) \quad (1-3)$$

不难看出,式(1-3)满足上述要求。

所以,定义式(1-3)中的 I 为消息 x 所含的信息量。

2. 信息量单位的确定

信息量的单位的确定取决于式(1-3)中对数的底 a 的确定。

如果取对数的底 $a = 2$,则信息量的单位为比特(bit, binary unit 的缩写),即

$$I = \log_2 \frac{1}{p(x)} = -\log_2 p(x) \text{ (b)} \quad (1-4)$$

如果取对数的底 $a = e$,则信息量的单位为奈特(nat, nature unit 的缩写),即



$$I = \ln \frac{1}{p(x)} = -\ln p(x) \text{ (nat)} \quad (1-5)$$

如果取对数的底 $a=10$, 则信息量的单位为哈特(Hart, Hartley 的缩写), 即

$$I = \lg \frac{1}{p(x)} = -\lg p(x) \text{ (Hart)} \quad (1-6)$$

上述3种单位的使用, 可根据计算及使用的方便程度来决定。目前应用最为广泛的单位是比特, 且为了书写简洁, 经常将 $\log_2$ 简写为 $\log$ 。

【例1-1】 设中文电报中4出现的概率为 $1/4$, 5出现的概率为 $1/8$, 试分别求出4和5的信息量。

解: 根据式(1-3)知:

$$I_4 = -\log p(x) = -\log(1/4) = 2(\text{b})$$

$$I_5 = -\log p(x) = -\log(1/8) = 3(\text{b})$$

值得注意的是, 这里“比特”是指抽象的信息量单位, 与计算机术语中“比特”的含义有所不同, 它是代表二元数字(binary digits)。它们之间的关系是每个二元数字能提供的最大平均信息量为1比特。

3. 等概率离散消息的信息量

假设某离散信息源有 N 个消息, 且这 N 个消息独立等概率出现。显然, 为了传递一个消息, 只需采用一个 N 进制的波形来传送。即传送 N 个消息之一等价于传送 N 进制波形之一。当 $N=2$ 时, 即为二进制。根据式(1-3), 可以得到传送两个等概率的二进制波形之一的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1(\text{b}) \quad (1-7)$$

这里选择的对数以2为底, 在数学上运算也是方便的。同时, 在数字通信中, 由于常以二进制传输方式为主, 因而这也是恰当的。按照式(1-3)的定义, 对于 $N>2$, 则传送每一波形的信息量应为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/N} = \log_2 N(\text{b}) \quad (1-8)$$

若 N 是2的整幂次($N=2^k$), 则上式可改写为

$$I = \log_2 2^k = k(\text{b}) \quad (1-9)$$

式(1-9)表明, $N(N=2^k)$ 进制的每一波形包含的信息量, 恰好是二进制每一波形所包含信息量的 k 倍。由于 k 就是每一个 N 进制波形用二进制波形表示时所需的波形数目, 所以传送每一个 $N(N=2^k)$ 进制波形的信息量就等于用二进制波形表示该波形所需的波形数目 k 。

综上所述, 只要在接收者看来每一传送波形是独立等概率出现的, 则一个波形所能传递的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{p}(\text{b}) \quad (1-10)$$

或

$$I = \log_2 N(\text{b}) \quad (1-11)$$

式中, N 为传送的波形数(和进制数); p 为每一波形出现的概率。



【例1-2】求四进制(3,2,1,0)等概率情况下的信息量。

解:根据式(1-8)知:

$$I = \log N = \log 4 = 2(\text{b})$$

4. 非等概率离散消息的信息量

设离散信息源是由 n 个符号组成的集合,称为符号集。符号集中的每一个符号 x_i 在消息中分别按概率 $p(x_i)$ 独立出现。又设符号集中各符号出现的概率为

$$\begin{pmatrix} x_1, & x_2, & \dots, & x_n \\ p(x_1), & p(x_2), & \dots, & p(x_n) \end{pmatrix}, \text{ 且 } \sum_{i=1}^n p(x_i) = 1 \quad (1-12)$$

则 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 所包含的信息量分别为 $-\log_2 p(x_1), -\log_2 p(x_2), \dots, -\log_2 p(x_n)$ 。每个符号所含信息量的统计平均值,即平均信息量为

$$H(x) = p(x_1)[- \log_2 p(x_1)] + p(x_2)[- \log_2 p(x_2)] + \dots + p(x_n)[- \log_2 p(x_n)] = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) (\text{b/符号}) \quad (1-13)$$

由于 H 和热力学中的熵形式相似,故通常又称它为信息源的熵,其单位为 b/符号。

【例1-3】设某信息源由4个符号0、1、2、3组成,它们出现的概率分别为3/8,1/4,1/4,1/8,且每个符号的出现都是独立的。试求某个消息:2013021103200120033020320102223的信息量和一个符号所携带的平均信息量。

解:

方法一:

在此消息中,0出现11次,1出现5次,2出现9次,3出现6次,消息共有31个符号。其中出现0的信息量为 $11 \log(8/3) = 15.56\text{b}$,出现1的信息量为 $5 \log 4 = 10\text{b}$,出现2的信息量为 $9 \log 4 = 18\text{b}$,出现3的信息量为 $6 \log 8 = 18\text{b}$,则该消息的信息量为

$$I = 15.56 + 10 + 18 + 18 = 61.56(\text{b})$$

平均(算术平均)一个符号的信息量为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号数}} = \frac{61.56}{31} = 1.986(\text{b/符号})$$

方法二:

用熵的概念计算此信息源每个符号所含信息量的统计平均值,即平均信息量为,根据式(1-13)有

$$H = -\frac{3}{8} \log \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log \frac{1}{8} = 1.906(\text{b/符号})$$

则该消息所含的信息量为

$$I = 31 \times 1.906 \approx 59.08(\text{b})$$

以上两种方法计算的两个结果略有差别的原因在于,它们平均处理方法不同。方法一按算术平均的方法,方法二按统计平均的方法,结果可能出现误差。这种误差将随消息中符号数的增加而减小。

可以证明,当各符号等概率时,即 $p(x_i) = 1/n, i = 1, 2, \dots, n$ 时,信源熵值最大为

$$H_{\max} = \log_2 n (\text{b/符号}) \quad (1-14)$$

设消息包含 n 个符号,则该消息的信息量为



$$I = nH(b) \quad (1-15)$$

5. 连续消息的平均信息量

连续消息的信息量可用概率密度来描述。

可以证明,连续消息的平均信息量(相对熵)为

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log_a f(x) dx \quad (1-16)$$

式中, $f(x)$ 为连续消息出现的概率密度。

限于篇幅,关于信息量就不做进一步的讨论。有兴趣的读者,可参考信息论有关专著。

1.1.6 主要性能指标

在设计和评价通信系统时,往往要涉及通信系统的主要性能指标,否则就无法衡量其质量的优劣。性能指标也称质量指标,它们是对整个系统综合提出或规定的。

通信系统的性能指标涉及很多,包括有效性(速度)、可靠性(质量)、适应性(环境条件)、标准性、保密性、经济性和可维护性等多个方面。但从研究消息的传输来说,通信的有效性和可靠性将是主要的矛盾所在。

有效性主要是指消息传输的“速度”问题,即快慢问题;而可靠性主要是指消息传输的“质量”问题,即好坏问题。显然,这是两个相互矛盾的问题,这对矛盾通常只能依据实际要求取得相对的统一。

1. 模拟通信系统的主要性能指标

(1) 有效性。模拟通信系统的有效性用有效传输带宽来衡量。同样的消息采用不同的调制方式,则需要不同的频带宽度。频带越窄,有效性越好。

(2) 可靠性。模拟通信系统的可靠性一般用接收端接收设备输出的信噪比来衡量。信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)是指接收端信号的平均功率和噪声的平均功率之比。在相同条件下,系统的输出端的信噪比越大,则系统的抗干扰能力越强,所以,信噪比越大,通信质量越高,可靠性越好。实际中,经常采用信噪比来衡量模拟通信系统的优劣。

2. 数字通信系统的主要性能指标

(1) 有效性。在数字通信系统中,有效性指标常用传输速率来衡量。传输速率主要有以下3种表示形式。

① 码元传输速率。码元传输速率又称码元速率或传码率,用符号 R_B 表示。它被定义为单位时间(每秒钟)内传送码元的数目,单位为“波特”(Baud),又称为波特率,常用符号“B”表示(注意,不能用小写)。例如,若某系统每秒钟传送2400个码元,则该系统的传码率为2400波特或2400B。

值得注意,码元传输速率仅仅表征单位时间内传送码元的数目,而没有限定这时的码元是何种进制。考虑到同一系统的各点上可能采用不同的进制,故给出码元传输速率时必须说明码元的进制和该速率在系统中的位置。设二进制码元传输速率为 R_{B2} , N 进制码元传输速率为 R_{BN} , 且有 $N = 2^k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$), 则二进制与 N 进制的码元传输速率有如下转换关系式

$$R_{B2} = R_{BN} \log_2 N = k R_{BN} (B) \quad (1-17)$$