

绪 论

本章提要

- 通信系统的组成及分类
- 数字通信的主要特点和主要技术
- 数字通信的性能指标

1.1 通信技术的发展与信息社会

人类生活在信息的海洋里,离不开信息的交流与传递。在日常生活中信息(information)往往以消息(message)的形式表现,如从远古的消息树、烽火台和驿马传令到现代的文字、语言、书信、数据、图像等都可看成是“消息”的集合。传递消息的目的就在于接收一方获取原来不知道的内容或信息。消息是具体的,但它不是信息本身。消息携带着信息,消息是信息的表达者。对于某一个消息,不同的接收者所获取的信息量是不同的。例如,某一条新闻说,今天北京地区下了大雪,北京人从中没有获得任何信息,因为他们已经知道;对于其他地区的人,却获得了一定的信息。再如天气预报报告某地区降水概率为 10%,人们普遍认为当天不会下雨,结果人们从当天下雨了的消息中获得的信息量的大小是与消息的接收者所处的状态有关。在日常生活中,“信息”这个用语缺乏确切的概念,而且有很强的主观性。科学上所说的信息正是从这个原始的、含糊不清的概念中概括、提炼得到的,它有严格、确切的含义,1948 年发表的香农信息理论给出了定量描述,第 2 章将详细阐述。

通信就是克服距离上的障碍,迅速而准确地交换和传递信息。信息常以某种消息的方式依附于物质载体,借以实现存储、交换、处理、变换和传输。人们要让信息在时域和空域上转移和转换,从此方传送到彼方,从前一时推移到后一时,从一种形式转移到另一种形式,就需要有装载信息的媒体。所谓媒体就是一种传送信息的手段,或装载信息的物质,如话音、磁盘、磁带、声波、电波等都可作为信息的媒体。通信技术的发展历史就是人们长期寻求如何利用各种媒体实现迅速而准确地传递更多的信息到更远处的历史。通信技术伴随着人类经济和文化的发展不断进步,尤其在近代社会,其发展速度一日千里。

早在远古时代,人们利用烽火、狼烟、金鼓、旗语作为表现信息和传递信息的手段,其表现能力极为有限。语言是人类通信的重要媒体,当它作用于人与人的关系时,是表达

相互反应或传递信息的中介;当它作用于人和客观世界的关系时,是人认知事物的工具,是文化信息的载体。文字是语言等信息的书写符号,是人与人之间交流信息的约定俗成的视觉符号系统。由于文字的发明,能传送的信息种类飞速增加,借助这种媒体,人们可以把各种信息准确无误地传送到遥远的地方。印刷术的发明使得向多人传送相同信息的手段发生了划时代的变化,它使书刊大批量印刷成为可能,使得信息流传远方,世代相传。此外,人们传达情感的手段还有绘画和雕刻等方式,它们成为古代人超越时间向现代人传递信息的媒体。

在 W. 希尔伯特指出了电的存在以后,科学家对电引起的各种现象进行了研究,逐步使其达到实用水平。继 1838 年莫尔斯发明电报之后,陆续诞生了多种利用电为媒体的信息传输手段,在传送信息的数量、速度及范围等方面有了迅速的发展。1876 年 A. G. 贝尔发明了电话,1896 年 G. 马可尼成功地发明了无线电报。电子管、晶体管的发明实现了把衰减的电信号放大,能把电报、电话传送到更遥远、更辽阔的地方。马可尼通信方式发展成无线电广播,进而出现了传送图像、照片、文件等信息的传真和电视广播等通信方式。

计算机的发明在现代通信技术的各种媒体中占有独特的地位。计算机在各领域作为信息处理设备,它与通信系统相结合,使电信业务更加丰富,产生了可视图文(videotex)、图文电视(teletext)等新的记录型媒体,还有电子邮件(E-mail),它是包括文字、话音、图形的电子信函。新的实时型媒体有电子会议(tele-conferencing),有计算机、话音、视像会议等形式,还有交互式电视,为用户提供许多视像节目。由此可见,在近代,媒体有了迅速的发展,使得 21 世纪成为发达的信息社会,其中多媒体通信将支撑未来信息社会的发展,在这种新的通信业务中同时存在着话音、文字、图形、图像、音响和视像等多种媒体,因此,其想象力十分丰富。

由于社会对通信技术的需要越来越迫切,大大推动了通信科学的发展,从 20 世纪 30 年代开始,尤其是 50 年代之后,人们逐步对通信实践中遇到的问题展开了深入的理论研究,并获得了可喜的进展,在通信理论上,先后形成了“过滤和预测理论”、“香农信息论”、“纠错编码理论”、“信源统计特性理论”、“信号保真度理论”、“调制理论”、“信号检测理论”等。在通信的体制上,由于电子管技术更加完善、晶体管出现以及集成电路问世,不仅促进了电话那样的模拟通信的高速发展,而且于 20 世纪中叶对电报通信方式有了重大的突破,出现了具有广阔前景的数字通信方式。在通信种类上,相继出现了脉码通信、微波通信、卫星通信、激光通信、移动通信和计算机通信等。在通信的对象上,突破了人与人之间通信的范畴,实现了人与机器或机器与机器之间的通信。现代通信正朝着以适应知识密集型信息化社会各种通信要求的方向发展。进入 70 年代以来,世界上的先进国家已完全掌握了在各种传输介质(微波、电缆、卫星、光纤等)中传输数字信号的技术。

从语言的产生、文字的创造、印刷术的发明到电报、电话的电气通信时代到来,从指南针到全球定位导航系统,从无绳电话、可视电话等多功能电话机、袖珍寻呼机、传真机到各种数据通信系统、会议电视系统、高清晰度电视等的使用,直到今天电子计算机的普及和微波、卫星、光纤、移动通信技术的飞速发展,人类通信产生了革命性的突变,从根本

上改变了传统的信息传输手段。人类每时每刻通过以建成的覆盖全球的各种通信网,包括地面的、海底的、空间的,在不同地域、不同社会、不同群体之间交换和传递着海量信息,以满足当今社会更加广泛、快捷、可靠、大容量、多方式的信息交换和传递要求。

现代通信系统是信息时代的生命线。传统的通信网已不适应现代通信的要求,为了给用户提供越来越多、越来越快的信息服务,通信技术正在大踏步地走向智能化和网络化。各单项技术汇成综合业务数字网络(Integrated Service Network, ISDN),开辟了网络时代的新纪元,是当前国际竞争的一个热点。由于数字通信具有一系列优点,在 20 世纪 80 年代,各国相继投入大量资金改建通信线路,使其逐步成为综合数字网(IDN),即除用户线以外,进入本地区交换局以后信息的传输、交换都将以数字形式进行,它可以方便地实现各种业务的处理和交换。80 年代末、90 年代初出现综合业务数字网(ISDN)的发展高潮。窄带 ISDN 迅速走向宽带化(Broadband)、智能化(Intelligent)和个人化(Personal),标志着信息传输技术走向成熟。宽带综合业务数字网(BISDN)、多媒体终端技术(MMT)、综合移动卫星通信(MSAT)、个人通信网(PCN)以及智能通信网(IN 或 AIN)等相继问世,使世界信息和通信市场空前繁荣。

1.2 通信系统的组成和分类

1.2.1 通信系统的组成

传递或交换信息所需的一切技术设备的总和称为通信系统。通信系统的一般模型如图 1.1 所示。

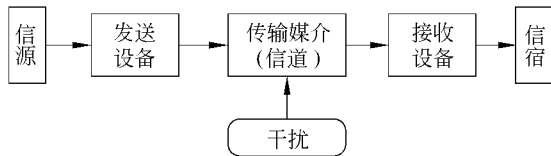


图 1.1 通信系统的一般模型

1. 信源和信宿

信源是发出信息的源,信宿是传输信息的归宿点。

信源可以是离散的数字信源,也可以是连续的(或离散的)模拟信源。模拟信源(如电话机、电视摄像机)输出连续幅度的模拟信号;离散数字信源(如电传机、计算机)输出离散的数字信号。数字信号与模拟信号的区别是幅度取值上是否离散,两者在一定条件下可以互相转换。

2. 发送设备

发送设备的基本功能是为使信源与传输媒介匹配起来,即将信源产生的消息信号变换为便于传送的信号形式送往传输媒介。变换方式是多种多样的,在需要频谱搬移的场

合,调制是最常见的。发送设备还包括为达到某些特殊要求而进行的各种处理,如多路复用、保密处理、纠错编码等。

3. 信道

信道是指传输信号的通道,从发送设备到接收设备之间信号传递所经过的媒介,可以是无线的,也可以是有线的。有线和无线均有多种传输媒介。信道即给信号以通路,也会对信号产生各种干扰和引入噪声。传输媒介的固有特性和干扰直接关系到通信的质量。

4. 接收设备

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换,即解调、解密、译码等。它的任务是从带有干扰的信号中正确恢复出原始消息。对于多路复用信号,还包括解除多路复用,实现正确分路。

以上所述是单向的通信系统。在多数场合下,信源兼为信宿,通信的双方需要随时交流信息,因而要求双向通信。电话就是一个最好的例子,通信双方都要有发送设备和接收设备,如果两个方向用各自的传输媒介,则双方可独立进行发送和接收;若共用传输媒介,则用频率或时间分割的办法来共享。

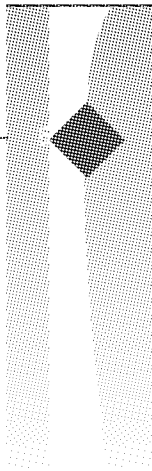
此外,通信系统除了完成信息传递之外,还必须进行信息的交换。传输系统和交换系统共同组成一个完整的通信系统,乃至通信网络。

1.2.2 通信系统的分类

1. 按通信的业务和用途分类

根据通信的业务和用途不同,有常规通信、控制通信等。常规通信又分为话务通信和非话务通信,话务通信业务主要是电话信息服务业务、语音信箱业务和电话智能网业务。非话务通信主要是分组数据业务、计算机通信、数据库检索、电子数据交换、传真存储转发、可视图文及会议电视、图像通信等。由于电话通信最为发达,其他通信常常借助于公共的电话通信系统。未来的综合业务数字通信网中,各种用途的消息都能在统一的通信网中传输、交换和处理。控制通信包括遥测、遥控、遥信和遥调通信等,如雷达数据通信和遥测、遥控指令通信等。根据不同通信业务的工作方式的要求,通信系统可以分为多种类型:

- 单媒体通信系统:如电话、传真等。
- 多媒体通信系统:如电视、可视电话、会议电话、远程教学等。
- 实时通信系统:如电话、电视等。
- 非实时通信系统:如电报、传真、数据通信等。
- 单向通信系统:如广播、电视等。
- 交互通信系统:如电话、点播电视(VOD)等。
- 窄带通信系统:如电话、电报、低速数据通信等。
- 宽带通信系统:如点播电视、会议电视、远程教学、远程医疗、高速数据通信等。



2. 按调制方式分类

根据是否采用调制,可将通信系统分为基带传输和调制传输。

基带传输是将未经调制的信号直接传送,如音频市内电话、数字信号基带传输等。

调制传输是对各种信号变换后传输的总称。调制的目的有以下几个方面:

(1) 便于信息的传输

调制过程可将信号频谱搬移到任何需要的频谱范围,便于与信号传输特性匹配。如无线传输是必须将信号载入在高频上才能使其易于以电磁波的形式在自由空间辐射出去。又如在数字电话中将连续信号变换为脉冲编码调制信号,以便在数字系统中传输。

(2) 改变信号占据的带宽

调制后的信号频谱通常被搬移到某个载频附近的频带内,其有效带宽相对于载频而言是一个窄带信号,在此频带内引入的噪声就减小了,从而提高了通信系统的抗干扰性。

(3) 改善系统性能

由信息论的观点可以证明,有可能用带宽增加的方式来换取信噪比的提高,从而提高通信系统的可靠性。各种调制方式有不同的带宽。表 1.1 给出常用调制方式及其用途。

表 1.1 常用调制方式及其用途

调制方式			用途
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 AM	广播
		抑制载波双边带调幅 DSB	立体声广播
		单边带调幅 SSB	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅 VSB	电视广播、数传、传真
	非线性调制	频率调制 FM	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制 PM	中间调制方式
	数字调制	幅度键控 ASK	数据传输
		频率键控 FSK	数据传输
		相位键控 PSK、DPSK、QPSK 等	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 QAM、MSK 等	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制 PAM	中间调制方式、遥测
		脉宽调制 PDM(PWM)	中间调制方式
		脉位调制 PPM	遥测、光纤通信
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	市话、卫星、空间通信
		增量调制 DM、CVSD 等	军用、民用电话
		差分脉幅调制 DPCM	电视电话、图像编码
		其他语音编码方式 ADPCM、APC、LPC 等	中、低速数字电话

3. 按传送信号的特征分类

按照信道中所传输的是模拟信号还是数字信号,把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。

4. 按信号的复用方式分类

传送多路信号有 3 种复用方式,即频分复用、时分复用和码分复用。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频谱范围;时分复用是用脉冲调制的方法使不同信号占据不同的时间区间;码分复用是用正交的脉冲序列携带不同信号。传统的模拟通信系统都采用频分复用。随着数字通信的发展,时分复用通信系统的应用越来越广泛,码分复用主要用于空间通信的扩频通信系统中。

5. 按传输媒介分类

通信系统分为有线(包括光纤)和无线两大类。表 1.2 中列出了常用的传输媒介及其主要用途。

表 1.2 常用传输媒介

频率范围	波长	符号	传输媒介	用途
3Hz~30kHz	$10^8 \sim 10^4 \text{ m}$	甚低频 VLF	有线线对、长波无线电	音频、电话、数据终端、长距离导航、时标
30~300kHz	$10^4 \sim 10^3 \text{ m}$	低频 LF	有线线对、长波无线电	导航、信标、电力线通信
300kHz~3MHz	$10^3 \sim 10^2 \text{ m}$	中频 MF	同轴电缆、中波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业余无线电
3~30MHz	$10^2 \sim 10 \text{ m}$	高频 HF	同轴电缆、短波无线电	移动无线电话、短波广播、定点军用通信、业余无线电
30~300MHz	$10 \sim 1 \text{ m}$	甚高频 VHF	同轴电缆、米波无线电	电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航
300MHz~3GHz	$100 \sim 10 \text{ cm}$	特高频 UHF	波导、分米波无线电	电视、空间遥测、雷达导航、点对点通信、移动通信
3~30GHz	$10 \sim 1 \text{ cm}$	超高频 SHF	波导、厘米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、雷达
30~300GHz	$10 \sim 1 \text{ mm}$	极高频 EHF	波导、毫米波无线电	雷达、微波接力、射电天文学
$10^5 \sim 10^7 \text{ GHz}$	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-6} \text{ cm}$	紫外、可见光、红外	光纤、激光空间传播	光通信

1.2.3 数字通信系统及主要技术

数字通信系统就是利用数字信号来传递信息的通信系统。图 1.2 给出了数字通信系统原理结构模型。数字通信系统涉及的技术问题很多,包括信源编码、保密编码、信道编码、数字调制、信道、数字复接及多址、数字信息交换和同步等。

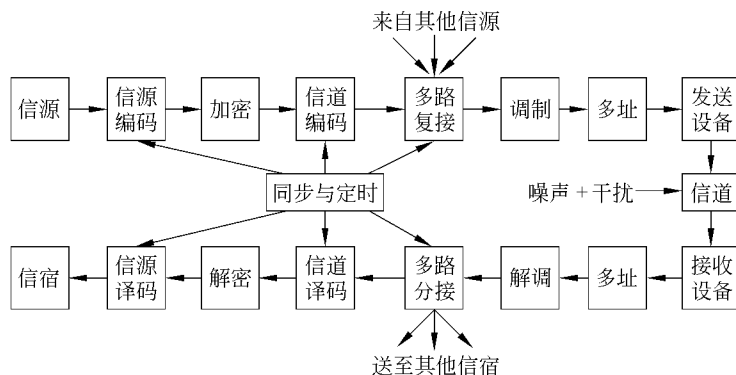


图 1.2 数字通信系统的组成

1. 信源编码与译码

模拟信号数字化是数字通信技术的基础。将声音或图像信号变换为数字信号并在数字通信系统中传输,要经过如下过程:首先对声音或图像信号进行时间上的离散化处理,这就是取样;然后将样值信号的幅度进行离散化处理,这就是量化。量化的目的是便于编码。除采用最基本的脉冲编码调制(PCM)外,为了提高数字编码信号的有效性,还需要尽量减少原信息的冗余度,进行压缩信号频带的编码,称之为信源编码。信源译码是信源编码的逆过程。由此可见,信源编码有两大主要任务:第一是将信源的模拟信号转变成数字信号,即通常所说的模/数变换;第二是设法降低数字信号的数码率,即通常所说的数据压缩。编码比特数在通信中直接影响传输所占的带宽,而传输所占的带宽又直接反映了通信的经济性,因此,信源编码技术在很大程度上是围绕压缩编码及提高通信的有效性等问题而发展的。

2. 加密与解密

为了保证数字信号与所传信息的安全性,一般应采取加密措施。数字信号比模拟信号易于加密,且效果更好,这是数字通信突出的优点之一。在要求保密通信的系统中,可在信源与信道编码之间加入加密器,同时在接收端加入解密器。加密器产生密码,人为地将输入明文数字序列扰乱。这种编码可以采用周期非常长的伪随机序列,甚至采用完全无规律的噪声码,这种处理过程称为加密。在接收端对接收到的数字序列进行解密,恢复明文。

3. 信道编码与译码

数字信号在信道中传输时,由于噪声、衰落以及人为干扰等,将产生差错。信道编码的目的就是提高通信的抗干扰能力,尽可能进行控制差错,实现可靠通信。信道编码的一类基本方法是波形编码,或称为信号设计,即把原来的波形变换成新的较好的波形,以改善其检测性能。编码过程主要是使被编码信号具有更好的距离特性(即信号之间的差别性更大),这类编码有双极性波形、正交波形、多元波形、双正交波形等。另一类基本方法可获得与波形编码相似的差错概率,但所需带宽较大,为了尽量把差错纠正过来,根据信道特性,采用一种对传输的原始信息按一定编码规则进行编码,达到对数字信息的保护作用,提高数字通信的可靠性。在接收端按一定的规则进行译码,看其编码规则是否

遭到破坏,在译码过程中发现错误或纠正错误,这种技术称为差错控制编码技术。目前应用较广泛的编码方法可分线性分组码和卷积码,可用反馈移位寄存器来实现,易于检错和纠错。分组码中著名的有汉明码、格雷码、BCH 码等。卷积码的主要特点是有记忆特性,所编成的码不仅是当前输入的信息码的函数,而且与以前输入的信息码有关。著名的卷积码译码算法有序列译码、维特比(Viterbi)最大似然译码。

4. 调制与解调

调制器的任务是把各种数字信号脉冲转换成适于信道传输的调制信号波形。这些波形要根据信道特点来选择。解调器的任务是将收到的信号转换成原始数字信号脉冲。数字调制技术可分为幅度键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)、连续相位调制(CPM)以及它们的各种组合。对于这些调制信号,在接收端可以进行相干解调或非相干解调,前者需要知道载波的相位才能检测,后者则不需要。对于高斯噪声下信号的检测,一般采用相关器接收机或抽样匹配滤波器。各种不同的调制方式具有不同的检测性能,其指标为比特差错概率 P_b ,它是比特能量与噪声功率谱密度之比(E_b/N_0)的函数。

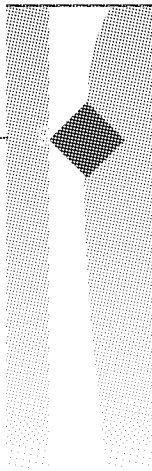
调制与编码过去一直是被分别研究的,前者实际上相当于波形编码。人们在分别优化的基础上,将二者统一考虑,互相匹配,以达到组合优化,研究出网格状编码调制技术(Trellis coded modulation),即在不增加带宽的条件下,通过增加符号集的冗余度,增加信号之间的最小距离差别。应用 Trellis 编码和正交幅度调制技术(QAM),人们研制出性能优秀的智能调制解调器(MODEM)产品。

若信号传输距离不太远且通信容量不太大,一般可采用电话电缆直接进行基带数字信号传输,就不需要调制和解调。由于除明线或电缆可以直接用于传输数字基带信号外,其他媒介都工作在较高的频段上,因此将数字基带信号不经过调制而直接送到信道传输的方式称为数字基带传输,将数字基带信号经过调制后送到信道传输的方式称为数字频带调制传输。

若数字信号不经过频带调制而用于基带传输,需要进行码型变换和波形滤波。对于噪声干扰下基带信号的传输,在接收端可用最大似然接收机、匹配滤波器或相关检测。如果传输通带不能满足理想传输的要求,会出现信号波形底部展宽的流散变形,产生码间串扰。数字通信经常研究的问题之一即如何消除码间串扰。一般可采用脉冲整形以减少所需带宽,也可采用横向滤波器或各种自适应均衡技术。

5. 多路与多址

在一个多用户系统中,为了充分利用通信资源和增加数据通信量,可以采用多路技术,满足多个用户要求固定分配或慢变化地分享通信资源;还可采用多址技术,以满足远程或动态变化地共享通信资源。基本的方法有频分、时分、码分、空分和极化波分,其共同点在于各用户信号间互不干扰,在接收端易于区分,利用了信号间互不重叠及在频域、时域和空域中的正交性或准正交性等特征。其中频分复用(FDM)、频分多址(FDMA)、时分复用(TDM)和时分多址(TDMA)是经典的多路与多址技术,码分多址(CDMA)技术利用了时在域、频域及二者组合编码的准正交性,空分复用和极化波分复用是指在不同空域中频率的重用和同一空域中不同极化波的重用。在实际系统中采用的多为这些



多路和多址技术的组合,如 TDM/TDMA、FDM/FDMA 等。随着卫星通信网、信包无线通信网和计算机局域网的应用和发展,出现了多种随机存取多址技术及相应的算法和协议,它们适用于突发信息传输系统,其性能主要表现在系统传输的吞吐量和延时上。目前,用于不同通信方式和网络的多址技术的研究是十分重要的领域,总的原则是获得最佳的通信资源共享方案。

6. 信道与噪声

信道指的是以传输媒质为基础的信号通路,它是传输信号的物理基础。不同的信道具有不同的特性。信道特性对整个系统及系统各部分的设计具有决定性的影响,因此设计的第一步就是要选择合适的信道并详细了解其特性。通常,数字信号可以在数字信道传输,也可以经过调制变成频带信号通过模拟信道传输,但从通信质量和经济性来考虑,数字信号传输还是采用数字信道为好。信道既给传输数字信号以通路,又给传输的数字信号以限制和影响。由于实际因素的影响,信号提供的频带总是有限的,信道特性也是不完善的,因此当数字信号通过信道时其功率因损耗而下降,还会受到信道噪声的损害。信道中的噪声分为两种:一种是高斯噪声(也称正态噪声),另一种是脉冲噪声(也称突发噪声)。数字通信系统设计的主要目标,一方面是设法消除或补偿信道引起的信号失真,另一方面是尽可能抑制和减小噪声的不良影响。

7. 同步与数字复接

同步问题是数字通信技术的核心问题之一,包括(比特)同步、帧同步、载波同步、网同步等。可以说,没有同步就没有数字通信。实现接收端对发送端的同步一般可采用锁相环法。在时分多路复用系统中,网同步不仅要解决由中心站决定全网定时问题,同时由于各分站的位置和距离不同,需要确定各分站至中心站及分站之间收发信号的同步。

在数字通信系统中,为了使终端设备标准化和系列化,同时适应不同传输媒介和不同业务容量的要求,通常将各种等级的终端设备组合配置,把若干个低速数码流按一定格式合并为高速码流。数字复接就是依据时分复用原理完成数码流合并的技术,包括复接和分接两部分功能。

1.2.4 数字通信的主要特点

从内因来看,数字通信相对于模拟通信具有如下优点。

1. 抗干扰能力强,无噪声积累,保证较高的通信质量

数字信号是取有限个离散幅度值的信号,在信道中传输时,在间隔适当的距离采用中继再生的办法消除噪声积累以还原信号,使得传输质量几乎与传输距离和网络布局无关,在多跨距线路中多段连接,信号的再生和处理也不会降低通信质量。模拟信号在传输过程中的噪声则不易消除,噪声是积累的。此外,数字信号传输中的差错可以通过差错控制编码来控制,从而进一步改善传输质量,提高通信的可靠性。

2. 便于加密处理

为了保证数字信号与所传信息的安全性,一般应采取加密措施。数字信号比模拟信

号易于加密,且效果也好,这是数字通信突出的优点之一。模拟加密技术由于多方面的条件限制很难做到高保密强度,数字信号的加密算法允许设计得复杂一些,保密强度受通信环境制约小,易于实现高保密强度。

3. 数字信号便于直接与计算机接口形成智能网

用现代计算机技术对数字信息进行处理,使得复杂的技术问题能以极低的代价来实现,形成智能网。由于它采用开放式结构和标准接口,增加或改变业务时,只需在计算机和数据库中修改相关参数即可。

4. 高度的灵活性和通用性

采用数字传输方式,可以采用先进的程控数字交换设备实现交换与综合,便于构成综合数字网(IDN)和综合业务数字网(ISDN)。由于数字传输线路对各种信息都具有很好的透明性,使得数字通信系统灵活、通用。所谓传输的透明性,是指在规定业务范围内的信息都可以在网内传输,对用户不加任何限制,即它可以传输图像、传真和电话等数字化的模拟信号,也可传输数字、符号、文字等离散的数字信号。由于可将各种信息都以数字脉冲的形式来处理,容易实现设备共享,在单一通信网上提供多种服务项目,根据某种规定,使设备容易识别和处理所有的信号和信息,而且可在时间轴上实现时分复用,在某个瞬间处理特定信息,以提供多种服务项目。

5. 设备便于集成化、微型化

由于数字通信设备中大部分电路是数字的,可用大规模集成电路实现,使得功耗较低,设备容易微型化。

但是,数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的系统频带为代价而换取的。以电话为例,1路模拟电话通常只占据4kHz带宽,但1路同样话音质量的数字电话可能要占据20~60kHz的带宽,因此数字通信的频带利用率不高,在系统频带紧张场合,这一缺点尤为突出。数字通信的另一个缺点是对同步要求高,系统设备比较复杂。随着社会生产力的发展,信息越来越宝贵,保密要求越来越高,实际中宁可牺牲系统频带而采用保密性能高的数字通信。至于系统频带富裕的情况,如毫米波通信、光通信等,数字通信几乎成了惟一的选择。

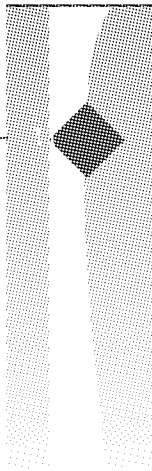
从外因看,推动数字通信日臻完善主要有下列因素。

(1) 信息化社会对数字通信技术的需求越来越迫切,许多领域采用来自计算机数据库远程终端的信息,特别是随着多媒体通信技术的发展,各种形式的数据传输需求不断增长,对传输的准确性要求不断提高。

(2) 一系列先进的通信系统发展迅速,尽管各系统(如卫星通信系统)在极高的数据传输速率条件下可完成全球通信,但由于极高的发射费用和由此引起的对功率和频带的限制,要求寻找有效利用信道资源的技术,如话音插控、按需分配、时分复用等,数字通信可以更好地满足要求。

(3) 要建立同时为不同速率和不同要求的用户提供服务的通信网,由于理论的原因,最好采用有效的数据压缩方法和多通路信道。

(4) 微电子技术的进步,超大规模集成电路、高速数字信号处理器、小型和微型计算



机的迅速发展,扩大了数字通信的理论效益,使复杂的技术问题能以极低的代价来解决。数字通信设备便于生产和固化,从技术上带动了数字通信的高速发展。

由于数字通信的一系列优点,短波通信、微波通信以及移动通信、卫星通信、光纤通信等都向数字化方向发展。随着微电子技术和计算机技术的迅速发展和广泛应用,数字通信将逐步取代模拟通信。

1.3 数字通信系统的主要性能指标

数字通信系统的主要性能指标是指传输的有效性和可靠性。有效性是指在给定的信道内能传输的信息内容的多少,可靠性是指接收信息的准确程度。这两者互相矛盾而又互相联系,通常是可以互换的。

1.3.1 有效性指标

传输的有效性可用传输速率和频带利用率来衡量。

1. 传输速率

(1) 码元传输速率(R_B)

码元传输速率简称传码率,又叫符号速率。它表示单位时间(每秒)内传输的码元(符号)个数,其单位为波特(Baud),简称波特率,常用符号“B”表示。码元传输速率仅仅表征单位时间内传输的码元数目,而没有限定码是何种进制的码元,即码元可以是多进制的,也可以是二进制的。在多进制码元传输时,每个码元叫做1波特;在二进制传输时,由于一个二进制码元叫做1比特(b),所以二进制传输时的传输速率单位写成比特/秒(b/s)。

码元传输速率又叫调制速率,它表示信号调制过程中,1秒钟内调制信号波(即码元)的变换次数。如果一个单位调制信号波的时间长度为 T_B 秒,那么调制速率为

$$R_B = \frac{1}{T_B} \quad (1.1)$$

例如对于二进制调制波,一个“1”或“0”符号的持续时间为 $T_B = 833 \times 10^{-6} \text{ s}$,则调制速率为

$$R_B = 1/T_B = 1/833 \times 10^{-6} \approx 1200(\text{B})$$

(2) 信息传输速率(R_b)

信息传输速率简称传信率,又称信息速率。它表示单位时间(每秒)内传送数据信息的比特数,单位为比特/秒,可记为“b/s”。

在信息论中已定义,信源发出信息量的度量单位是“比特(b)”。对于一个二进制码元,即一个“0”或“1”在等概率(即 $P = \frac{1}{2}$)发送条件下,输出1b信息,所以信息速率的单位是b/s。

对于二进制传输,其传输速率和信息速率是一致的,可记为

$$R_B = R_b = n_0 \quad (1.2)$$

其中, n_0 是每秒传输的二进制码元数。

对于 N 进制传输, R_B 和信息速率可以通过公式(1.3)来换算, 这时必须将 N 进制码元折合为相应的二进制码元。表 1.3 所示为四进制和二进制码元的对应关系。

表 1.3 四进制与二进制码元的对应关系

四进制码元	二进制码元	四进制码元	二进制码元
0(对应电平值为-3)	0 0	2(对应电平值为 1)	1 1
1(对应电平值为-1)	0 1	3(对应电平值为 3)	1 0

$$R_b = R_B \log_2 N \quad (1.3)$$

其中, N 为符号的进制数(如 $N=2$, 为二进制; $N=4$, 为四进制), R_b 为信息传输速率, R_B 为符号传输速率。

如果符号速率为 600B, 二进制的信息传输速率为 600b/s, 四进制时为 1200b/s, 八进制时为 1800b/s。

通信中需要传输的数据信号的速率有高有低, 范围很宽, 低的每秒几比特, 高的可达每秒几百兆比特。从通信的有效性而言, 传输速率的高低直接与通信容量大小有关。信道所允许传输的最大信息速率称为信道容量。传输速率高时要求大容量信道, 低传输速率下可以是小容量信道。从另一方面讲, 传输速率的高低将直接涉及对传输信道频带宽度的要求。高传输速率要求的信道传输频带宽, 低传输速率要求较窄的信道带宽。

2. 频带利用率

在比较不同通信系统的效率时, 单看传输速率是不够的, 还应看在此传输速率下占用的频带宽度。通信系统占用的频带越宽, 传输信息的能力越大。所以, 真正衡量数字通信系统传输效率(有效性)的指标应当是单位频带内的传输速率, 即

$$\eta = \frac{\text{符号传输速率}}{\text{频带宽度}} \quad (1.4)$$

二进制传输可表示为

$$\eta = \frac{\text{信息速率}}{\text{频带宽度}} \quad (1.5)$$

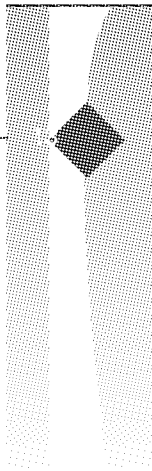
式(1.4)中 η 的单位为 B/Hz, 式(1.5)中 η 的单位为 b/(s · Hz)。

1.3.2 可靠性指标

衡量数字通信系统可靠性的主要指标是误码率, 即在传输过程中发生错误的码元个数与总码元个数之比, 用 P_e 表示为

$$P_e = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\text{误码的个数 } n}{\text{传输的总码数 } N} \quad (1.6)$$

这个指标是多次统计结果的平均量, 所以是指某一段时间内的平均误码率。对于同一条通信线路, 由于测量的时间长短不同, 误码率也不一样。在测量时间相同的条件下, 时间



分布不同,如上午、下午或晚上,结果也不相同。所以通信设备的性能应以较长时间的平均误码率来评价。

误码率的大小由传输通路的系统特性和信道质量决定,如果系统特性和信道都是高质量的,则误码率较低。综合业务数字网(ISDN)的误码性能指标是:按秒计算的误码率大于 10^{-3} 所占时间比例少于 0.2%;按分计算的误码率大于 10^{-6} 所占时间比例少于 10%;按秒计算的误码所占时间少于 8%(即无误码时间为 92%)。

显然,提高信道信噪比(信号功率/噪声功率)可使误码率减小。另外,缩短中继段距离可提高信噪比,从而使误码率减小。

除了上述三种指标外,评价数字通信系统的性能还有可靠度、适应性、使用维护性、经济性、标准性及通信建立时间等指标。

小结

本章主要介绍数字通信的基本知识,以期对数字通信系统建立一个总体概念,主要内容有通信系统的组成和分类;数字通信的主要技术问题及其特点;消息、信号、信息的概念;数字通信系统的主要性能指标。

从数字通信系统模型可以看出,数字通信涉及的技术问题很多,包括信源编译码、加密与解密、信道编译码、数字调制解调、信道与噪声、同步与数字复接、复用与多址通信问题等。

按传输信号的形式不同,有模拟通信系统和数字通信系统之分,两者从总体组成上讲基本相同,只是在具体结构上有区别。无论模拟通信还是数字通信,评价和衡量系统性能优劣的主要指标是通信的有效性和可靠性。其中信息速率(比特率)、传输数码率、频带利用率等是描述数字通信系统有效性的重要指标,误码率是描述数字通信系统可靠性的重要指标。有效性和可靠性是矛盾的两方面,但有着内在的联系,其中一方面的改善将以牺牲另一方面的利益为代价。

习题与思考题

- 1.1 模拟信号与数字信号之间的区别是什么?
- 1.2 试画出话音信号、数字数据信号的基带传输和频带调制传输的系统方框图。
- 1.3 试简述数字通信的优点,并说明为什么具有这些优点。
- 1.4 在数字通信系统中,可靠性和有效性指的是什么? 各有哪些重要的指标?
- 1.5 设在 $125\mu\text{s}$ 内传输 256 个二进制码元,计算信息传输速率。若该信码在 2s 内有 3 个码元发生错误,其误码率是多少?
- 1.6 某一数字信号的符号传输速率为 1200B,试问它采用四进制或二进制传输时,其信

息传输速率各为多少？

- 1.7 假设频带带宽为 1024kHz 的信道的传输速率为 2048kb/s 的比特率,试问其传输效率为多少？
- 1.8 已知某十六进制数字信号的传信率为 2400b/s ,试问它的传码率为多少波特？若将它转换为四进制数字信号,这时的传码率为多少波特？若转换成二进制数字信号,结果又如何(设转换时系统的传信率保持不变)？

预备知识

本章提要

- 傅里叶级数与傅里叶变换
- 冲激信号及其响应
- 概率密度函数与分布函数
- 随机信号的数字特征
- 消息、信号、信息及其度量

2.1 信号处理和分析的基础知识

宇宙中的一切事物都处在不停的运动中,物质的一切运动或状态变化,广义来说都是一种信号(signal),即信号是物质运动的表现形式,是消息的表现形式,是包含信息的物理量,它可以是声音、振动或者是温度和光的强度等。

通常,传递消息的信号形式都是随时间变化的,如温度信号、压力信号、光信号、电信号等,它们反映了事物在不同时刻的变化状态。由于电信号处理起来比较方便,所以工程中常把非电信号转化为电信号(简称为信号)进行传输。

由于在传送信号的过程中经常会出现一些困扰,如传送声音或图像信号时,由于有较大的杂音使想听的声音不能很好地收听,传真的图像不清晰等。为了使信号更清楚,要尽量抑制多余的噪声,对信号作相应的处理,提取所需要的信号。

实际信号包含多种成分,可以用污水处理的概念去理解信号处理,即从包含多种成分的对象中把需要保留和不需要保留的成分分离出来这一点来看,信号处理和污水处理是一样的。若预先知道作为对象的信号具有什么样的性质,或者包含什么样的成分时,将它们提取出来进行处理,这就是信号处理的最终目标。但当不很了解对象的性质时,首先必须很好地研究其信号特性以及对象的物理性质与信号的关系,这就是信号的分析,换句话说,必须对信号的来源进行分析。通过对信号的分析 and 了解去发现对象的特征,才能够有效地实现信息传递,这就是信号处理和分析的重要性。

2.1.1 信号的种类

1. 随机信号

图 2.1 给出了各种信号的波形,它们所表示的是完全不同的物理量,既有如(a)~(c)

图那样以时间为变量的信号,也有如(d)图那样以物体表面某一方向的位置为变量的信号。即使都是时间函数的信号,其纵轴的刻度也完全不同,也就是说,信号的自变量可以是任意的,如时间、位置。传统上,信号与系统学科所涉及的信号都是随时间变化的物理量,其波形称为时域波形(Waveform)。目前,信号与系统学科涉及的信号很多都不是随时间变化的,但仍习惯地称之为时域波形。

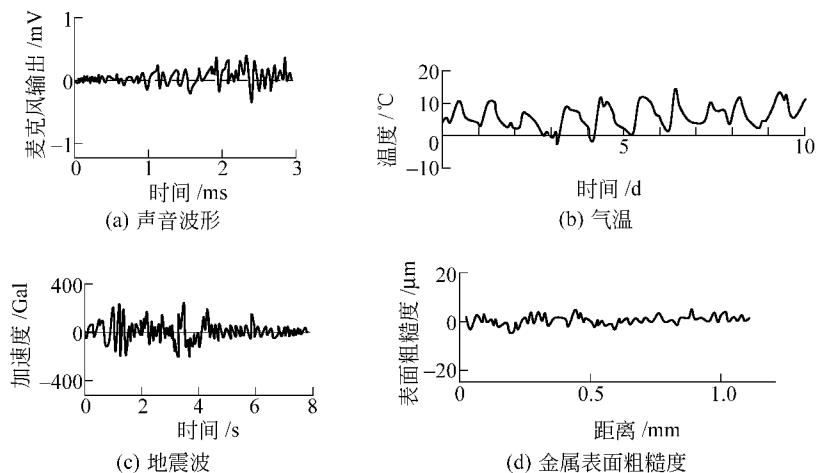


图 2.1 各种信号的波形

上面给出的信号都是仅有时间或者位置一个变量的信号,还有具有两个以上变量的信号,其代表是图像信号。如在电视画面上取正交的两个坐标轴构成的 x - y 平面坐标系,若将点 (x, y) 的画面辉度(亮度)用 $g(x, y)$ 表示,它仍可以看做一种信号。将有一个变量的信号称为一维信号,如图像信号那样具有两个变量的信号就称为二维信号。

然而,上述信号都是知道某一时刻(地点)的测定值,却不能确定其后信号的变化趋势。例如气温信号,知道了今天中午的气温,虽然能够在某种程度上预测明天中午的气温,却不能确定,这样的信号称为随机信号(random signal)。相反,也有任何时刻(地点)的数值能够被其前某一时刻(地点)的数值所确定的信号,比如不论如何摇动音叉,它总能发出准确的单一频率的声波。由于此波可以由三角函数表示,当观测点确定后,其声波强度可以准确地表示为时间的函数,这样的信号称为确知信号(deterministic signal)。

2. 确知信号

确知信号中最具代表性的是正弦波。随时间 t 变化的正弦波 $f(t)$ 可写成

$$f(t) = A \sin(\omega t + \theta)$$

式中, A 表示信号的大小,称为振幅(amplitude); ω 称为角频率(angular frequency); θ 称为相位(phase)。

如同正弦波,在某个确定的时间间隔内重现相同波形的信号称为周期信号(periodic signal)。当周期信号的周期为 T 时,此信号在时间轴方向错开 T 或者 $2T, 3T, \dots$ 出现相同波形,如图 2.2 所示,对于整数 $n(n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 其一般形式为

$$f(t+nT) = f(t)$$

例如,函数 $\sin t$ 在具有周期 $T=2\pi$ 的同时,还会有 $4\pi, 6\pi, \dots$ 的周期。由此可知,周期信号是以整数倍为间隔周期出现的。最短的周期称为基本周期。

除正弦波以外,常见的周期信号有方波(矩形波)、锯齿波和三角波等。

在某一段短时间内能量集中的单个信号称为脉冲信号,如图 2.3 所示。在稍微广泛的意义上,把能量有限且经历足够短的时间后完全消失的信号称为孤立波或非周期信号,即可以视为周期在无限区间上的有限能量的信号。

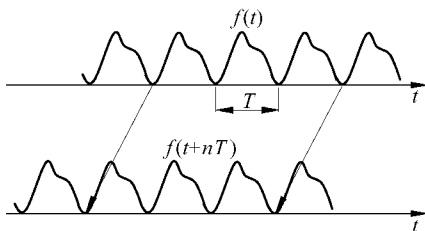


图 2.2 周期信号

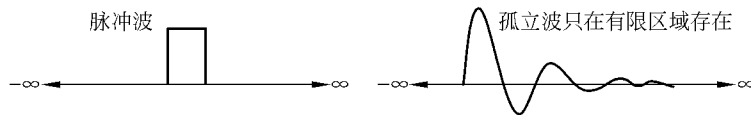
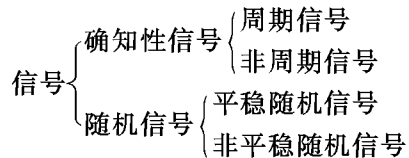


图 2.3 孤立波或非周期信号

在电系统中,有随时间变化的电压信号和电流信号这两种主要的形式,分别用时间函数 $u(t)$ 和 $i(t)$ 表示,或一般记为 $f(t)$ 、 $x(t)$ 、 $y(t)$ 等,显然这里的函数就是信号。信号随时间变化的规律是多种多样的,大致分类如下:



2.1.2 模拟信号和数字信号

在处理信号时,作为对象的物理量一般都是连续变化的。例如,考察气温随时间变化的信号,由于气温是连续变化的,理论上可以每隔无限小的时间进行测定,但要保存和处理测定的数据,对其划分的程度不是越细越好。再说,气温不会每分每秒地急剧变化,在条件允许的情况下,应尽量减少数据量,以便缩短计算时间,减少数据存储空间。另外,绝对的精度是没有必要的,气象局给出的全国各地气温是每小时的测定值,其精度是 $1/10$ 度,这就足够了。

连续变化的物理量信号叫做模拟信号(analog signal)。将模拟信号变换为离散值称为离散化。离散化包括对变量的离散化和函数值的离散化,如图 2.4 所示。将变量在某一区间的值用一个数值来表示的离散化称为取样(sampling),对函数值的离散化称为量化(quantization)。变量和测定值(函数值)被离散化了的信号统称为数字信号(digital signal)。

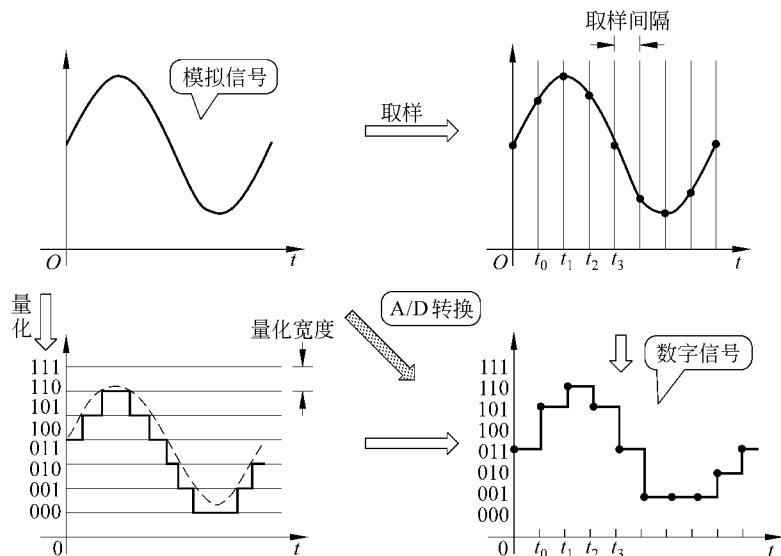


图 2.4 将模拟信号变换为数字信号

2.1.3 信号的表达和分析方法

法国数学家傅里叶(J. B. J. Fourier, 1768—1830 年)提出“不存在不能用三角级数表达的函数”。这一学说,通过进一步的理论证实被确切表示为:将不同频率的正弦波以适当方式叠加组合,可以合成任意的波形。这一理论的确定对信号处理有很大的作用。

如图 2.5 所示,图 2.5(a)表示的函数为

$$f(t) = 2\sin t - \sin 2t$$

这是三角函数的和,即三角级数的形式。若再加上一项,构成函数

$$f(t) = 2\sin t - \sin 2t + \frac{2}{3}\sin 3t$$

如图 2.5(b)所示。增加更多项,可构成函数

$$\begin{aligned} f(t) = & 2\sin t - \sin 2t + \frac{2}{3}\sin 3t - \frac{1}{2}\sin 4t + \frac{2}{5}\sin 5t - \frac{1}{3}\sin 6t \\ & + \frac{2}{7}\sin 7t - \frac{1}{4}\sin 8t + \frac{2}{9}\sin 9t - \frac{1}{5}\sin 10t \end{aligned}$$

如图 2.5(c)所示。观察此三角级数表达式可知,若用整数 n 确定其系数 b_n 时,此函数可以表示为

$$b_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{n}$$

$$f(t) = \sum_{n=1}^M b_n \sin nt$$

其中, b_n 是角频率为 $n\Omega$ 的正弦波的振幅,即其相应频率分量的大小。

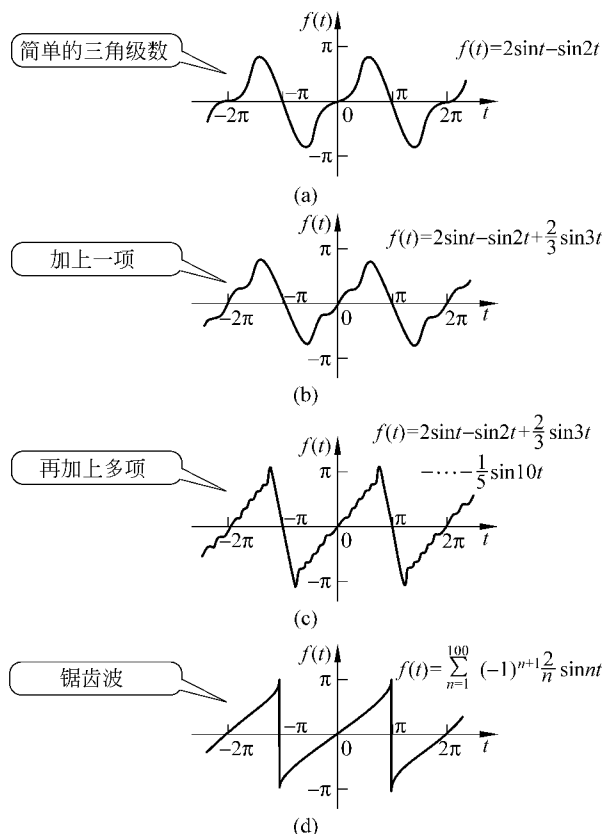


图 2.5 三角级数

图 2.5(c) 所示的函数 $f(t)$ 是 $M=10$ 的情形。进一步增大 n 值, 若 $M=100$, 函数 $f(t)$ 如图 2.5(d) 所示。尽管此函数是三角级数, 但其波形与锯齿波非常近似, 说明随时间变化的三角函数是不同频率、不同振幅、不同相位的正弦信号的合成。由此看出, 傅里叶的理论对处理信号波形有着指导性的意义。尽管图 2.5(d) 所示的信号波形不平滑, 包含有间断点, 但仍可看出信号的分解方法及合成法则。

事实上, 在自然界中有很多物理现象的波形是由不同频率的分量合成的。以光为例, 它由从波长约 $800\text{\AA}$ (埃, $1\text{\AA}=0.1\text{nm}$) 的红光到波长约 $4000\text{\AA}$ 的紫光的电磁波合成。大家都知道, 当白色光通过棱镜时, 由于各色光波长不同, 折射率也不同, 因而得到 7 种美丽的色彩(光谱)。这证明了白色光是由不同波长的光合成的。如同使用棱镜将光分解为光谱, 以讨论色的配合和进行光的分析那样, 也可以将信号分解为不同频率的分量, 研究信号是如何产生的, 经过了什么样的环节, 在传输过程中受到什么样的影响等, 以获得信号来历及其经历等信息。这种分析方法称为谱分析(spectral analysis)或傅里叶分析(Fourier analysis)。

通过对傅里叶理论的进一步探索, 人们认识到傅里叶理论的核心和牛顿-莱布尼兹微积分理论的指导思想有相似之处, 即“化整为零, 积零为整”, 也就是将复杂问题分割成许多相对简单的问题来分别处理, 再对处理后的简单问题合理整合, 从而完成复杂问题的

处理和解决。对于不同类型的函数信号来说,正弦信号($\sin\omega t$ 或 $\cos\omega t$)是最简单的,是除直流信号外的惟一单频率函数信号,傅里叶理论告诉我们,任意信号都可以分解为不同频率、不同振幅、不同相位的正弦信号或合成。周期信号和非周期信号的处理方法是分别对其进行傅里叶级数展开和傅里叶变换。

1. 周期信号的傅里叶级数展开

设信号周期 $T=2\pi$, 即最低角频率 $\Omega=1$ ($\Omega=2\pi/T$)。若 Ω 为任意值, $T=2\pi/\Omega$, 则 $f(t)$ 的一般表示为

$$f(t) = f(t+kT), \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

$f(t)$ 可用傅里叶级数展开(Fourier series expansion)为

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \Omega t + a_2 \cos 2\Omega t + a_3 \cos 3\Omega t + \dots \\ &\quad + b_1 \sin \Omega t + b_2 \sin 2\Omega t + b_3 \sin 3\Omega t + \dots \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

式中,将波长最长的波,即 $\sin \Omega t$ 和 $\cos \Omega t$ 叫做基波或基次谐波。 Ω 称为基波角频率,其频率为 $f_1=2\pi/\Omega$; 将其一半周期的波称为二次谐波,其角频率为 2Ω , 频率 $f_2=2f_1$; $1/3$ 周期的波称为三次谐波,其角频率为 3Ω , ……以此类推。由式(2.1)可知, a_0 是表示 $f(t)$ 的平均值的常数项,若 $f(t)$ 是电信号, a_0 表示其直流部分, a_0 以外的傅里叶系数表示交流部分。

在这里,将 a_0, a_n, b_n 称为傅里叶系数(Fourier coefficient),其物理含义为正比于各分量的振幅大小。式中将常数项定义为 $a_0/2$, 特意用 2 来除是为采用 a_n 的一般表示形式, $\cos n\Omega t$ 为当 $n=0$ 时的 a_n 。由高等数学推知傅里叶系数为

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos n\Omega t dt, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin n\Omega t dt, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

显然,当 $f(t)$ 给定后, a_0, a_n 和 b_n 确定, $f(t)$ 的傅里叶级数展开就可以写出。因为

$$a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t = A_n \cos(n\Omega t + \varphi_n)$$

所以,式(2.1)也可表示为

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\Omega t + \varphi_n) \quad (2.2)$$

式中

$$\begin{cases} A_0 = a_0 \\ A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \varphi_n = -\arctan \frac{b_n}{a_n} \end{cases} \quad (2.3)$$

将图 2.6(a)所示信号用傅里叶级数展开,分解为直流部分和各高次谐波部分的图形