

通信工程丛书

数字通信传输系统

李乐民 赵梓森 翁则贵
杨知行 吴慕龙 骆正彬
等编著
主编：李乐民

数字通信



中国通信学会主编 • 人民邮电出版社

丛 书 前 言

为了帮助我国通信工程技术人员有系统地掌握通信学科有关专业的基础理论知识，提高解决专业科技问题、做好实际工作的能力，了解通信技术的新知识和发展趋势，以便为加快我国通信建设、实现通信现代化作出应有的贡献，我会与人民邮电出版社协作，组织编写这套“通信工程丛书”，准备陆续出版。

这套丛书的主要读者对象是从事通信工作不久的大专院校通信学科各专业毕业生、各通信部门的助理工程师、工程师和其他通信工程技术人员。希望能够有助于他们较快地实际达到通信各专业工程师所应有的理论水平和技术水平。

这套丛书的特点是力求具有理论性、实用性、系统性和方向性。丛书内容从我国实际出发，密切结合当前通信科技工作和未来发展的需要，阐述通信各专业工程师应当掌握的专业知识，包括有关的系统、体制、技术标准、规格、指标、要求，以及技术更新等方面。力求做到资料比较丰富完备，深浅适宜，条理清楚，对专业技术发展有一定的预见性。这套丛书不同于高深专著或一般教材，不仅介绍有关的物理概念和基本原理，而且着重于引导读者把这些概念和原理应用于实际；论证简明扼要，避免繁琐的数学推导。

对于支持编辑出版这套丛书的各个通信部门和专家们，我们表示衷心感谢。殷切希望广大读者和各有关方面提出宝贵的意见和建议，使这套丛书日臻完善。

中国通信学会

一九八五年九月二十日

前 言

数字通信与模拟通信相比，有抗干扰性强、可用再生中继避免干扰积累、便于加密、便于交换及设备易集成化等等优点。近年来，光纤通信进入实用化，成本低于同轴电缆通信，而最适合光纤传输的信号形式是数字的。由于大规模集成电路和计算技术的发展，用程序控制的数字电话时分交换机也已实用化。这种交换机改善了服务质量、体积小、维护管理方便、可以方便地与数字传输系统相配合。随着信息社会的发展，除电话服务外，还需要有数据、电报、传真、电视会议等服务，迫切需要建立综合业务数字网。因此，数字通信必将加速发展。

数字通信包括终端（模拟信号数字化、时分复用等）、传输、交换等方面的内容。本书目的是讲传输系统，阐述数字信号传输以及系统方面的知识。

评价一个数字通信传输系统，频谱利用效率和抗干扰性能是两个重要的方面。传输一路脉冲编码调制数字电话信号所需的频带常比传输一路模拟电话信号宽。这是不利的。但是，由于数字通信抗干扰性强，可以利用模拟通信不宜使用的频带。例如，扩展市话中继电缆的使用频带，传送多路数字电话；发展11吉赫以上的数字微波中继通信等。近年来，数字微波中继通信还采用了频谱利用率很高的数字调制方式，使每兆赫传送的数字电话路数与模拟传输时的路数相当。对于传输数据，用数字信道与用模拟信道（附加调制解调器）相比，在相同带宽内前者常能传输更高的数据速率。这样，不能笼统地说数字通信的频谱利用效率没有模拟通信高。本书前两部分着重讲解频谱利用率和抗干扰性能。

第一章介绍数字通信概况。第二章讲基带传输，第三章讲数字

调制与解调，这两章着重说明基本原理和频谱利用率，而抗干扰性能分析则集中在第四章。第二到四章是了解有关数字传输系统所需的基本知识。对于均衡、定时恢复等方面的知识，则在介绍有关传输系统时结合起来讲解。定时恢复在第五章中讲，但这部分内容对其他各章的传输系统也是有用的。

第五到八章从系统的角度，讲各种数字传输系统。内容包括信道特性、系统构成、系统设计考虑等。从发展方向来看，地面通信系统，特别是大城市间，将以光纤通信为主，并用微波中继通信相配合。长距离通信，特别是国际通信，卫星通信起着重要作用。国内卫星通信可解决边远地区通信。除了光纤、微波中继、卫星通信外，在目前已存在的市话电缆上采用多路数字电话传输，是有经济价值的。本书重点讲数字电缆传输（第五章）、数字光纤传输（第六章）和数字微波中继传输（第七章），而把其他的数字传输系统合并为第八章。本书对数字卫星通信叙述较简，并不是因为它不重要，面是因为篇幅限制。近年来已有一些数字卫星通信书籍出版（见第八章参考文献），可供进一步参考。

本书第一到四章由李乐民编写。第五章5.2、5.3-5.7及其余各节分别由张乘风、李正元、翁则贵编写初稿。第六章由赵梓森编写。第七章由杨知行编写，姚彦和孔宪正审阅。第八章8.1、8.2节分别由吴慕龙、骆正彬编写。全书由李乐民主编。

本书若有不妥之处，请读者指正。

第一章 数字通信概述

1.1 信号的各种形式

人们在日常工作和生活中，需要交流思想和传递消息。例如，用书信、电报、传真、电话通消息，用广播、电视报道消息。消息的处理、传递和交换属于通信。随着电子计算机的广泛使用，还需要有人与计算机或计算机与计算机间的通信。用电的方法来进行通信，称为电通信，有时简称通信或电信。

用电信号表示消息，有各种形式。按照时间与幅度的取值情况来分有：

(1) 时间与幅度都连续的信号

例如，电话机话筒输出的电话信号和电视摄像机输出的电视信号属于这种信号。它在时间上是连续的，也就是在不同的时间都可能信号变化；在幅度上也是连续的，也就是幅度可在连续的区间内取值。图1.1(a)示出这种信号波形。

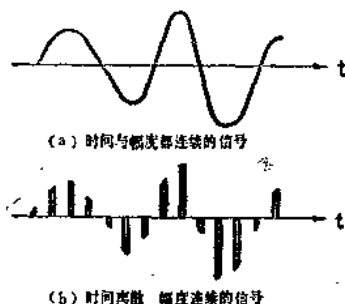


图 1.1 (a) 时间与幅度都连续的信号 (b) 时间离散、幅度连续的信号

(2) 时间离散、幅度连续的信号

将图1.1(a)的信号送到一个取样开关, 开关每隔时间 T 连通很短的时间, 输出信号波形如图1.1(b)所示。如果连通时间 τ 很小, 则图1.1(b)中单个窄脉冲可近似为平顶的。图1.1(b)的信号又称为脉冲幅度调制信号。可以证明[1-3], 如果取样频率选得足够高, 将取样后的信号通过低通滤波器, 能还原得原来的时间连续信号。

(3) 时间连续、幅度离散的信号

在电报通信中, 如果用电传打字机, 打一个字键后, 输出一串电流脉冲。我们称有电流为传号, 无电流为空号。在等待状态, 电传机输出传号。例如, 对于用国际五单位电码表的电传机, 按F键后, 输出电流波形如图1.2所示。先送出一个起动信号(空号, 持续一个单位时间), 接着是五单位电码, 每个“1”或“0”持续

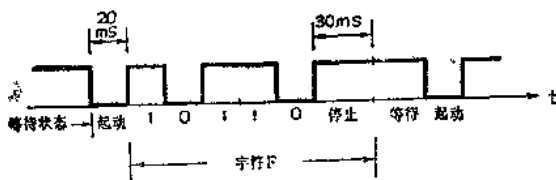


图 1.2 电传电报信号

一个单位时间, 后面还有一个停止信号(传号, 持续1.5单位时间)。启动和停止信号是供接收端控制电传打字机机械部分起动和停止用的。若电传机按每秒钟送出50个传号或空号工作, 通常称工作速率是50波特, 而一个单位时间是20毫秒。图1.2信号的特点是只有二种幅度, 即有电流或无电流。由于按键时间是随机的, 在任何时间都可能产生幅度变更。我们称这种信号是一种时间连续、幅度离散的信号。幅度离散是指幅度取值为有限的, 图1.2是只有二种幅度的例子。

另一个时间连续、幅度离散的例子是脉冲位置调制信号〔2.8〕。上面讲过的图1.1(b)中，用脉冲幅度代表传送的消息。可以将幅度变化的脉冲序列变换为位置变化的脉冲序列，即以脉冲位置偏离未调脉冲位置的距离来表示消息，称为脉冲位置调制信号，如图1.3所示。位置偏离与幅度有对应关系，所以，在接收端可以反变

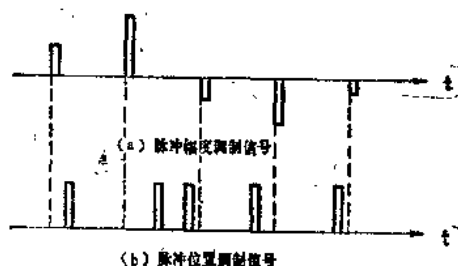


图 1.3 脉冲位置调制信号

换为幅度调制信号，再经低通滤波得取样前的信号。

(4) 时间与幅度都离散的信号

图1.4示出一种电码波形的例子。在时间段 kT 到 $kT + \tau$ ($k =$



图 1.4 单极性归零码

$\dots, 0, 1, 2, 3, \dots$) 内，信号幅度等于 A 或 0 ；在别的时间段内，幅度恒为 0 。图1.4中的 τ 小于 T ，我们称这种电码为单极性归零码，这里单极性指的是只有正极性。若 $\tau = T$ ，则称单极性不归零码。图1.4与图1.2信号的不同点是前者在离散时间 kT 或 $kT + \tau$ 有幅度跃变，后者则在任何时间都可能

质上，图1.4波形可以用离散幅度的时间序列来表示。计算机与计算机间进行高速通信时，通常送出的就是这种信号。

上面按时间与幅度取离散或连续值，说明了四种信号形式。下面再说明信号形式是可以变换的。

时间与幅度都连续的信号可以经过窄脉冲取样，变换为时间离散、幅度连续的信号（见图1.1）。我们有时称后者为取样数据信号，一个样值可以在连续的幅度范围内取值。用低通滤波器可以进行反变换。

如果将取样数据信号通过一个量化器，即将它的幅度取值变为有限的几种，例如，将幅度限制为0、1、2、…7共8种，原来的幅度是1.3变为接近的1，则得到幅度离散的取样信号。当然，量化会引起失真，幅度种数分得愈多，量化失真愈小。如果我们用3位二进制码代表上例的8种幅度，每一种码的排列表示一种幅度，则可将上例量化后的取样信号变为二进制码（或称二进制码），就得时间与幅度都离散的信号。上述取样、量化与二进制编码的过程如图1.5所示。图中，二进制码采用了不归零形式。

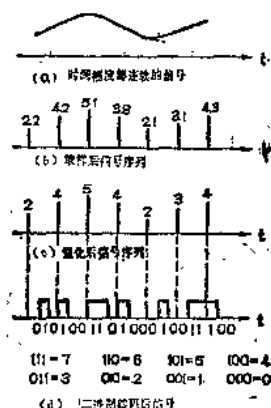


图 1.5 时间与幅度都连续的信号变换为时间与幅度都离散的信号

时间连续、幅度离散的信号也可以变换为时间与幅度都离散的信号。例如，对于图1.2的电传电报信号，最简单的方法是直接取样法。将图1.2的电压波形送到一个D触发器的D端，取样定时脉冲送到CP端。若D触发器是在CP脉冲下降沿起移位作用的，则在每一个取样脉冲下降沿，输出Q就改变为此时的输入幅度，并保持不变，直到下一个取样脉冲下降沿到来。这样，输出是时间与幅度都离散的信号。图1.6示出有关波形。输入波形是在任意时间都可能有幅度跃变，而输出波形只可能在取样脉冲的下降沿有跃变。这种变换相当于将信号跃变的时间进行量化，当然，这会引入畸变。增加取样频率，可减小畸变。但是，取样频率愈高，相当于输出不归零码的速率愈高（传号为连1码，空号为连0码），传输时所需带宽也愈大。有时，为了不过多地增加输出码的速率，采用将量化后的跃变时间用一组二进制编码来表示。对于电传电报信号，除了上述的取样法和时间编码法外，也可以将电传机输出的信号先储存起来，然后按固定速率再传出去。在存储转发中，可以将起动和停止信号去掉，但在输出信号中应加帧同步码，使接收端知道五单位码是从哪个码起算的。这种方法对带宽利用最经济。

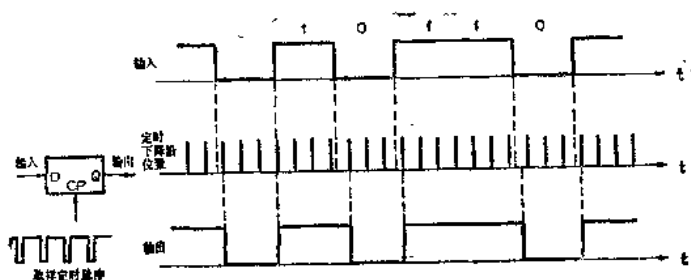


图 1.6 电报信号的取样变换

1.2 模拟通信与数字通信

我们常称时间与幅度都连续的信号为模拟信号。“模拟”两字是从模拟计算机而来的，模拟计算机中，用连续变化的电压或电流模拟实际系统中的变量。模拟信号的传输和交换属于模拟通信。

我们常称时间与幅度都离散的信号为数字信号。当幅度只有两种取值时，为二元数字信号。数字信号的传输和交换属于数字通信。

数字信号的传输，在中继站可以再生，避免畸变和噪声的累积。例如，发送的数字信号如图1.7(a)所示，是采用正、负电压的不归零码，正电压表示“1”，负电压表示“0”。经过传输、中继站放大后的波形如图1.7(b)所示，波形发生畸变，并叠加有噪声。图1.8示出一种再生方法，用一个比较器和一个D触发器(移位寄存器)。比较器输出的是数字电压(即高低电压)，当输入波

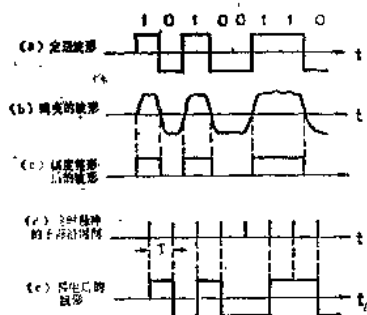


图 1.7 数字信号再生的有关波形

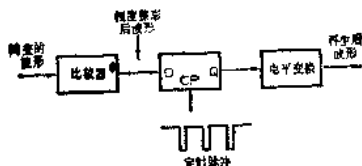


图 1.8 数字信号再生的一种实现方法

形大于零电压时输出高电压，当输入波形小于零电压时输出低电压，得图1.7(c)波形（图中采用TTL电路接口电压）。比较器输出的幅度恢复为两种状态，但是，幅度跃变时间仍不是等间隔的，所以，还需要重新定时。送到D触发器cP端的是定时脉冲，其周期等于一个码的宽度 T ，其下降沿在时间上对准了输入码的中心部分（若D触发器在定时脉冲的下降沿进行移位），相当于在中心部分取样。当下降沿到来时，输出Q成为输入D的状态，然后保持不变直到下一个下降沿到来。这样，再经电平变换，就得到再生后的用正负电压表示的不归零数字信号，如图1.7(e)。

实际运用中，如果在移位时刻，噪声幅度超过了有用信号幅度，则本来是正电压幅度会变成负电压或本来是负电压变成正电压，再生出来的码就有错误，称为误码。产生的二进制误码数与总的发送二进制数相比，称为二进制的误码率。误码率是数字信号传输中的一个重要指标。此外，再生时用的定时脉冲可能有相位抖动（见5.5.3节），即其周期不是严格地等于 T ，则再生出来的信号，其跃变时间也有抖动，对于相位抖动，也有规定的要求。

模拟信号传输在有多多个中继站时，因不能再生，畸变和噪声会累积。

时间离散、幅度连续的信号不能作幅度上的再生。时间连续、幅度离散的信号可以作幅度上的再生，但是，例如脉冲位置调制信号，幅度跃变时间受畸变和噪声影响后不能再生复原。因此，还不是完全的数字通信。采用脉冲位置调制和脉冲幅度调制的通信属于模拟脉冲通信。

电信信号的起动时间是连续随机变量，所以在有干扰和畸变时不能精确地确定。由于一个单位时间是固定的，所以可将畸变信号整形为单位时间符合规定的信号。电信信号是用离散幅度来代表有用信息的，所以有的文献中也将其归类为数字信号。

数字通信可以分为三个方面：

(1) 数字通信终端。将消息变换为数字信号与反变换，包括必

要的处理。例如，在发送端将代表消息的模拟信号（电话、电视、传真等）用编码方法变换为数字信号，接收端进行反变换的设备；用时间划分方法，将多路数字信号进行合路和分路的复接设备；用于保密通信的加密设备等。

（2）数字信号传输。将数字信号从一处传送到另一处。为了保证传输质量，长距离传输时每隔一定距离要设置中继站。本书内容属于这一个方面。

（3）数字交换。将散布在很大范围内的很多用户联结起来，实现消息的交换。

数字终端设备、数字传输系统与数字交换系统合起来，可以组成一个综合数字网。用综合数字网建立各种服务（如电话、数据、会议电视等），成为综合业务数字网（*Integrated Services Digital Network*，简称ISDN）。

数字通信发展很快，在通信中的比重逐年增加，其原因有下列各点：

（1）电子计算机的应用和自动化的发展，使要传送的数字信号增多。

（2）将各种模拟信号变为数字信号再传送，则通信网要传送的信号都是数字的，使得调度方便。

（3）数字信号传输在中继站可以再生，避免干扰和畸变的累积。

（4）数字电路容易集成化，使设备体积减小，成本降低。

（5）对于数字化信号可以进行高保密处理。

（6）数字化后可以提高精度。例如，电压用数字方法表示，精度比用模拟方法高。

下面两节再对数字通信终端和数字信号传输的有关问题作些介绍。

1.3 模拟信号的数字化与时分复用

电话是重要的通信业务，数字通信的各种标准与电话的数字化密切相关。下面先对模拟电话信号的数字化作些介绍。

将模拟电话信号变换为数字信号的方法之一如图1.5所示，上面已说明过。这种方法称为脉冲编码调制（*Pulse Code Modulation*，简称PCM）。模拟电话信号的频带一般取300到3400赫。若用PCM，则取样频率用8000赫。每个样值分为256种幅度。为了减小量化失真的影响，对于小信号分得精细些，称为非线性量化。用八位二进制码表示256种幅度，就得到每秒有64000个二进制码的数字信号，我们称数码率为64千比特/秒。比特是bit（binary digit 二进制码）的音译。

脉冲编码后的数字电话信号在接收端再恢复为模拟电话信号。影响话音质量的因素很多，其中有误码率。对于PCM电话，一般认为总误码率应小于 10^{-5} 。当有多个中继段时，若各中继段不是在同一个码位置发生错误，则总的误码数是各段误码数相加。因此，一个中继段的误码率应小于总误码率。

除了脉冲编码调制外，目前实用的还有将一路模拟电话信号用增量调制变换为32千比特/秒的数字信号^[4]，适合于对话音质量不太高的场合使用，允许误码率为 10^{-8} 。增量调制后的速率还可降为16千比特/秒，但话音质量有所降低。

利用去除信源中多余度的方法，可以将话音信号变换为速率低于9600比特/秒的数字信号。例如，采用线性预测编码，速率可降为2400比特/秒，但是话音的自然度还不够好，目前适合于窄带保密电话用。

话音信号数字化的方法很多，这里不再详述。

在实际场合，常要在一个信道上传送多路数字电话信号。可以用时间划分方法将多路数字信号集合起来，接收端再分开。对于多

路PCM电话，目前国际上采用的有二种系列。一种是欧洲和我国采用的30路系列。由30个PCM电话信号（每路64千比特/秒）合成一个基群信号，数码率为2.048兆比特/秒（等于 32×64 千比特/秒，其中两路用于勤务电话、振铃、帧同步信号等）。四个基群信号用二次群复接器把它们合成一个二次群信号，数码率为8.448兆比特/秒，其中包括合群时加入的额外数码。相象地，可合成高次群。另一种是北美和日本采用的24路系列。表1.1示出两种系列的分级情况。

表 1.1 PCM数字电话的两种系列

系 列	分 级	话 路 数	数 码 率 (兆比特/秒)	速率容差
30 路 系 列	基 群	30	2.048	$\pm 50 \times 10^{-6}$
	二 次 群	120	8.448	$\pm 30 \times 10^{-6}$
	三 次 群	480	34.368	$\pm 20 \times 10^{-6}$
	四 次 群	1920	139.264	$\pm 15 \times 10^{-6}$
	五 次 群	7680	564.992	$\pm 15 \times 10^{-6}$
24 路 系 列	基 群	24	1.544	$\pm 50 \times 10^{-6}$
	二 次 群	96	6.312	$\pm 30 \times 10^{-6}$
	三 次 群	672(美)	44.736	$\pm 20 \times 10^{-6}$
		480(日)	32.064	$\pm 10 \times 10^{-6}$
	四 次 群	4032(美)	274.176	$\pm 10 \times 10^{-6}$
		1440(日)	97.728	
	五 次 群	5760(日)	397.200	$\pm 10 \times 10^{-6}$

关于各次复接器的具体要求，国际电报电话咨询委员会（CCITT）有各种建议^[8]。

频分多路模拟电话集体编码后的速率应纳入表1.1的系列。例如，60路频分多路电话信号（频带312到552千赫，称为超群）可用

576千赫的速率取样, 每个样用12位编码, 再加同步码等, 合成得二次群速率8.448兆比特/秒。300路频分多路电话信号可变换为三次群速率34.368兆比特/秒。

其他非电话信号的编码速率也应纳入表1.1的系列。例如, 6兆赫带宽的广播彩色电视可用8或9位PCM变换为四次群139.264兆比特/秒, 其中包括帧同步与伴音用码; 也可以用差分PCM变换为约68兆比特/秒, 这样, 一个四次群能容纳二路广播彩色电视。采用压缩编码技术能将广播电视用三次群数码率传输。会议电视可用二次群或基群数码率传输。

速率为600、1200、2400、4800、9600、48000比特/秒的数据, 可以用时分复用方法合成64千比特/秒, 使能利用一个PCM电话信道进行传输, 这是用数字通信网传输数据的情况。要指出的是, 由于目前很多通信系统仍是模拟的, 因此, 常利用模拟电话信道传输数据。方法是用数据调制器将数据信号变换, 当作模拟电话来传输, 接收端再解调。这种调制解调器也称为数传机。一路模拟电话传送的数据速率实用上低于9600比特/秒, 速率愈高设备愈复杂。可见, 在传输速率方面, 用数字电话信道传送数据比用模拟电话信道优越。

1.4 数字信号传输

数字信号从一处传送到另一处, 需要有数字传输设备和传输媒介。

数字通信终端送出的数字信号, 其频谱范围一般是从零开始的, 称为基带。用基带频谱进行传输, 称为基带传输。将基带数字信号对载波进行数字调制, 搬移到较高的频带上传输, 称为频带传输或载波传输。根据具体的传输情况, 需要选用合适的基带频谱形状与数字调制方法。有时, 为了降低误码率, 还采用差错控制方法, 在发送数码中加入一些附加的码, 使收端能识别有无误码, 将

错误的码纠正过来，或通知发端重发。

传输媒介有电缆、光缆、各种频段的无线电传播等。表1.2示出频段的划分。

表 1.2 无线电波划分

频段序号N*	频率范围	频段名称	波长范围	波段名称
2	30—300赫(Hz)	极低频ELF	10^4 — 10^8 公里	
3	300—3000赫	音频VF	10^3 — 10^2 公里	
4	3—30千赫(kHz)	甚低频VLF	10^2 —10公里	超长波
5	30—300千赫	低频LF	10—1公里	长波
6	300—3000千赫	中频MF	10^3 — 10^2 米	中波
7	3—30兆赫(MHz)	高频HF	100—10米	短波
8	30—300兆赫	甚高频VHF	10—1米	米波
9	300—3000兆赫	特高频UHF	100—10厘米	分米波
10	3—30吉赫(GHz)	超高频SHF	10—1厘米	厘米波
11	30—300吉赫	极高频EHF	10—1毫米	毫米波
12	300—3000吉赫			

* $N \rightarrow 0.2 \times 10^N - 8 \times 10^N$ 赫，包括上限，不包括下限。

对于微波波段，历史上在雷达技术中用英文字母分波段。由于习惯和简便，在通信技术中有时也沿用。不过，各种资料不尽统一。表1.3示出一种命名法。

光波的频率高于无线电波，见表1.4。波长的单位也用埃($\text{\AA}$)， $1\text{\AA} = 10^{-10}$ 微米。

不同传输媒介的传输特点，将在第五到八章中介绍。

由于目前模拟通信仍用得较多，数字信号的传输有两种情况：一种是利用原有模拟传输设备，予以改造或附加一些设备；一种是在开始设计时就建立数字信道。前一种情况的例子有：用一路模拟电话信道，附加调制解调器，传送数据；用多路载波电话的一个群路（如12路基群、60路超群等），附加调制解调器，传送高速数字信号；在现有频分多路载波电话所用的频带之上或频带之下传输数字信号，称为“话上数据”或“话下数据”；对模拟无线电通信设

表 1.3

微波波段简名

波 段	名 义 频 率 范 围
L	1—2 吉赫 (GHz)
S	2—4 吉赫
C	4—8 吉赫
X	6—12 吉赫
Ku	12—18 吉赫
K	18—27 吉赫
Ka	27—40 吉赫
Q	36—46 吉赫
V	46—56 吉赫
W	56—100 吉赫

表 1.4

光 波 划 分

名 称	波 长 范 围	频 率 范 围
红外光	300—0.78 微米	10^{12} — 4×10^{14} 赫
可见光	0.78—0.38 微米	4×10^{14} — 7.9×10^{14} 赫
紫外光	0.38—0.03 微米	7.9×10^{14} — 10^{15} 赫

备, 保留收发信机, 在基带部分或中频接口前改用数字传输设备。
本书第五到八章介绍的是后一种情况。

第一章参考文献

- (1) 倪维桢等, 数字电话通信原理, 人民邮电出版社, 1982年。
- (2) 樊昌信等, 通信原理, 国防工业出版社, 1981年。
- (3) 张树京等, 通信系统原理, 中国铁道出版社, 1981年。
- (4) 清华大学无线电系, 增量调制数字电话终端机, 人民邮电出版社, 1977年。