

目 录

CONCENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 移动通信技术的特点与面临的挑战	1
1.2 移动通信发展历程	2
1.3 移动通信展望	11
1.4 移动通信标准化组织	13
第 2 章 信源编码与信道编码技术	17
2.1 信源编码技术	17
2.2 信道编码技术	35
2.3 网络编码	44
2.4 自适应编码调制	53
2.5 混合自动重传请求	55
第 3 章 调制技术	58
3.1 概述	58
3.2 最小移频键控	70
3.3 高斯最小移频键控	74
3.4 QPSK 调制	79
3.5 高阶调制	89
3.6 正交频分复用	93

第 4 章 抗衰落技术	97
4.1 概述	97
4.2 分集技术	99
4.3 均衡技术	108
4.4 扩频通信	113
4.5 多天线技术	116
第 5 章 蜂窝组网技术	123
5.1 移动通信网的基本概念	123
5.2 频率复用和蜂窝小区	126
5.3 多址接入技术	129
5.4 移动通信系统网络结构	144
5.5 移动性管理	149
第 6 章 第二代、第三代移动通信技术	156
6.1 GSM 系统及关键技术研究	156
6.2 WCDMA 系统及关键技术研究	161
6.3 CDMA2000 系统及关键技术研究	165
6.4 TD-SCDMA 系统及关键技术研究	172
6.5 WiMAX 系统及关键技术研究	180
第 7 章 第四代移动通信技术	189
7.1 概述	189
7.2 LTE 系统	191
7.3 LET 中的关键技术	200
7.4 LTE-Advanced 系统	213
第 8 章 第五代移动通信技术	222
8.1 5G 性能需求与目标	222
8.2 5G 应用场景	224
8.3 5G 的整体网络架构	229
8.4 5G 关键技术	239
8.5 5G 网络规划	267
第 9 章 6G 展望	286
9.1 6G 研究背景	286

9.2 6G 的愿景	288
9.3 6G 的应用场景	290
9.4 6G 网络性能指标预测	292
9.5 6G 的潜在关键技术	293
9.6 6G 的标准化进展	303
参考文献	305

西北工业大学出版社

西北工业大学出版社

第 1 章

绪 论

人类诞生之初，就有了通信的需求。从本质上看，通信就是人与人之间的相互沟通。通信技术的进步，就是人类不断突破空间与时间的限制、不断丰富沟通的形式和内容、不断加强相互之间联系的过程。电报的出现，使得文字信息可以迅速传递数百乃至数千千米的距离；电话的发明，使得人类可以进行及时的语言沟通；而开始于 20 世纪 70 年代的移动通信，更是使人类真正向随时随地沟通的理想迈进了一大步，使信息沟通的渠道前所未有的通畅。移动通信作为一个高度技术化的产业，先进技术的高效应用和国际标准化在其发展历程中起到了至关重要的作用。本章首先分析移动通信技术的特点与面临的挑战，然后简单回顾了移动通信系统的发展历程，最后描述了移动通信技术的发展现状和标准化进展。

1.1 移动通信技术的特点与面临的挑战

移动通信的发展非常迅速，智能手机已经成为人们不可或缺的通信工具和社交平台。移动通信能够提供随时随地通信的便利，但相对于具有稳定传输介质的有线通信，它也面临着许多独有的技术挑战，必须适应移动通信的技术特点，才能真正提供令人满意的服务。

第一，移动通信技术必须适应复杂多变的移动通信传播环境。

由于通信的一方、双方或多方是移动的，使用无线电波作为媒介进行传输就成了唯一可行的方法。电磁波在通信的各方之间传输，遇到障碍物会产生反射、折射和衍射等现象，穿透墙壁、窗户等障碍物会使其强度削弱，降雨、汽车和人的走动也会导致传输条件的极大变化。在汽车、火车等高速移动的交通工具上的通信则使得这些变化更加迅速和剧烈。移动通信技术要在所有可能的环境中正常工作，就必须具有很强的适应性与稳健性。

第二，无线频谱资源是开放和共享的，干扰控制就成为移动通信系统设计的重中之重。

同一区域内所有的移动通信用户使用同一个媒介：相同或不同频率的电磁波。不同系统和用户间不可避免地会产生相互干扰。为了使通信顺畅地进行，就必须把干扰控制在一个可接受的范围内。如何给尽可能多的用户提供服务，同时使每个用户所遭受的干扰又不至于影响其通信质量，是移动通信系统设计的一个难题。

第三，适合进行移动通信的频谱资源非常有限。

如果观察一下各国管制机构对无线电频谱的划分，就可以发现真正能够用于移动通信的频谱资源并不充裕。适合移动通信的频率主要分布在 6GHz 以下，且很大部分已分配给无线电导航、雷达、卫星、工业科学医疗和 GPS 等应用。更低的频率大多已经被更早出现的无线电技术（如广播、电视和对讲机等）占据。通信的频段越高，可用的带宽越大，能提供的通信速率就越高，但是传播损耗也会越大，不能覆盖很长的距离，甚至一堵墙就能把信号完全阻隔，导致建网成本就越高。因此，更高频率的频谱在蜂窝移动通信系统中的应用受到限制。

此外，移动通信还受到其他方面因素的限制，如需考虑对人体健康的影响，移动通信设备的发射功率必须保证不对人体健康产生危害。

综上所述，使用有限的频谱资源，为尽可能多的用户提供有吸引力的服务，是移动通信技术发展的核心目标。在多重限制条件下进行优化设计，则是移动通信必须面对的挑战。

1.2 移动通信发展历程

移动通信的发展是从无线电通信的发明开始的。1897 年，马可尼完成了一个固定

站与一艘拖船之间进行的无线通信试验，距离为 18 海里。这一试验证明了收发信机在移动和分离状态下通过无线信道进行移动通信是可行的，标志着移动通信的开始。

现代移动通信技术的发展始于 20 世纪 20 年代，大致可分为 6 个不同的阶段。

第一阶段是从 20 世纪 20 年代至 40 年代的早期发展阶段。在这期间，人们在短波几个频段上开发出了专用移动通信系统，其代表是美国底特律市警察使用的车载无线电系统。该系统工作频率为 2MHz。到 40 年代无线通信系统的频率提高到 30~40MHz。我们可以认为这个阶段是现代移动通信的起步阶段，特点是为专用系统开发，工作频率较低。

第二阶段从 20 世纪 40 年代中期至 60 年代初期，公用移动通信业务开始发展。1946 年根据美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）的计划，贝尔实验室在圣路易斯城建立了世界上第一个公用汽车电话网，称为“城市系统”。当时使用三个频道，间隔为 120kHz，通信方式为单工，随后，法国（1956 年）、英国（1959 年）等国相继研制了公用移动电话系统。这一阶段的特点是从专用移动网向公用移动网过渡，接续方式为人工接续，网络容量较小。

第三阶段从 20 世纪 60 年代中期至 70 年代中期。在此期间，美国推出了改进型移动电话系统，使用 150MHz 和 450MHz 频段。德国也推出了具有相同技术水平的 B 网。可以说，这一阶段是移动通信系统改进与完善的阶段，其特点是采用大区制、中小容量，实现了自动选频并能自动接续到公用电话网。

第四阶段从 20 世纪 70 年代中期到 80 年代中期。1978 年年底，美国贝尔实验室研制成功高级移动电话系统（Advanced Mobile Phone System, AMPS），建成了蜂窝状移动通信网，大大提高了系统容量。1983 年，首次在芝加哥投入商用。到 1985 年 3 月已扩展到 47 个地区，约 10 万移动用户。在此期间，由于蜂窝理论的应用，频率复用（Frequency Division Multiplexing, FDM）的概念得以实用化，大大提高了频谱效率。

第五阶段是从 20 世纪 80 年代中期至 21 世纪初，这个阶段数字移动通信系统得到了大规模的应用，其代表是欧洲的全球移动通信（Global System for Mobile communications, GSM）系统和美国的 CDMA 系统。数字蜂窝网络相对于模拟蜂窝网，其频谱利用率和系统容量得到了很大的提高。这个阶段的移动通信系统已经提供数据业务，业务类型大大丰富。

随着通信网络技术、微电子技术、计算机技术、人工智能技术迅速发展，新业务

不断出现，新型宽带无线通信标准和产业化都得到了飞速发展。2019 年，第五代（The Fifth-Generation, 5G）移动通信系统开始商用，我国成立了国家第六代（The Sixth-Generation, 6G）移动通信系统研发推进工作组和总体专家组，移动通信又进入了一个新的阶段（第六阶段）。

从第四阶段出现第一代移动通信系统开始，移动通信系统又可以进一步分为如下几个发展阶段（有的资料也把第四阶段到第六阶段合称为第四阶段）。

1.2.1 第一代移动通信系统

1986 年，第一代移动通信系统（The First-Generation, 1G）在美国芝加哥诞生，采用模拟信号传输，即将电磁波进行频率调制后，将语音信号转换到载波电磁波上，载有信息的电磁波发布到空间后，由接收设备接收，并从载波电磁波上还原语音信息，完成一次通话。1G 主要代表有：美国的先进的移动电话系统（AMPS）、英国的全球接入通信系统（TACS）和日本的电报电话系统（NMT）。由于各个国家的 1G 通信标准并不一致，使得第一代移动通信并不能“全球漫游”，这大大阻碍了 1G 的发展。同时，由于 1G 采用模拟信号传输，所以其容量非常有限，一般只能传输语音信号，且存在语音品质低、信号不稳定、涵盖范围不够全面，安全性差和易受干扰等问题。最能代表 1G 时代特征的，是美国摩托罗拉公司在 20 世纪 90 年代推出并风靡全球的大哥大，即移动手提式电话。大哥大的推出，依赖于第一代移动通信系统（1G）技术的成熟和应用。

说起第一代移动通信系统，就不能不提大名鼎鼎的贝尔实验室。1978 年年底，美国贝尔试验室研制成功了全球第一个移动蜂窝电话系统——先进移动电话系统（Advanced Mobile Phone System, AMPS）。5 年后，这套系统在芝加哥正式投入商用，并迅速在全美推广，获得了巨大成功。同一时期，欧洲各国也不甘示弱，纷纷建立起自己的第一代移动通信系统。瑞典等北欧 4 国在 1980 年研制成功了 NMT-450 移动通信网并投入使用；联邦德国在 1984 年完成了 C 网络（C-Netz）；英国则于 1985 年开发出频段在 900MHz 的全接入通信系统（Total Access Communications System, TACS）。

在 1G 系统中，美国 AMPS 制式的移动通信系统在全球的应用最为广泛，它曾经在超过 72 个国家和地区运营，直到 1997 年还在一些地方使用。同时，也有近 30 个国家和地区采用英国 TACS 制式的 1G 系统。这两个移动通信系统是世界最具影响力

的 1G 系统。

中国的第一代模拟移动通信系统于 1987 年 11 月 18 日在广东第六届全运会上开通并正式商用，采用的是英国 TACS 制式。从中国电信 1987 年 11 月开始运营模拟移动电话业务到 2001 年 12 月底中国移动关闭模拟移动通信网，1G 系统在中国的应用长达 14 年，用户数最高曾达到 660 万。如今，1G 时代像砖头一样的手持终端——大哥大，已经成为很多人的回忆。

第一代移动通信系统主要采用的是模拟技术和频分多址（FDMA）技术。由于受到传输带宽的限制，不能进行移动通信的长途漫游，只能是一种区域性的移动通信系统。第一代移动通信有多种制式，我国主要采用的是 TACS。第一代移动通信有很多不足之处，如容量有限、制式太多、互不兼容、保密性差、通话质量不高、不能提供数据业务和不能提供自动漫游等。第一代移动通信系统主要用于提供模拟语音业务。此外，安全性和干扰也存在较大的问题。1G 系统的先天不足，使得它无法真正大规模普及和应用，价格更是非常昂贵，成为当时的一种奢侈品和财富的象征。与此同时，不同国家的各自为政也使得 1G 的技术标准各不相同，即只有“国家标准”，没有“国际标准”，国际漫游成为一个突出的问题。

1.2.2 第二代移动通信系统

第二代（The Second-Generation, 2G）移动通信系统是无线数字系统，具有比第一代模拟系统更高的频谱效率和更强的鲁棒性。主要的 2G 技术包括全球移动通信系统（Global System for Mobile communications, GSM）、CDMAOne、时分多址接入系统和个人数字蜂窝网（Personal Digital Cellular, PDC）。CDMAOne 也称 IS-95，主要用于亚太地区，北美和拉丁美洲。GSM 在欧洲和全球范围的其他多数国家开发和使用。TDMA 系统采用 IS136 北美标准，中于 TDMA 是 1G 标准 AMPS 的演进，因此该系统也称为数字高级移动电话系统（Digital Advanced Mobile Phone System, D-AMPS）。PDC 是日本专用的 2G 标准。

表 1-1 描述了上述 4 种主流 2G 系统间的区别，给出了各自的无线基本参数（例如调制方式、载波频率间隔和主要接入方式等）以及服务级别参数（例如初始数据速率和话音编码算法等）。

表 1-1 主要 2G 系统参数对照表

参数	系统名称			
	GSM	CDMAOne	TDMA	PDC
工作频段/MHz	900	800	800	900
调制方式	GMSK	QPSK/BPSK	QPSK	QPSK
载波频率间隔/kHz	200	1250	30	5
载波调制速率	270kb/s	48.6kb/s	1.2288Mchip/s	42kb/s
每载波业务信道	8	61	3	3
主要接入方式	TDMA	CDMA	TDMA	TDMA
初始数据速率/(kb/s)	9.6	14.4	28.8	4.8
话音编码算法	RPE-LTP	CELP	VSELP	VSELP
话音速率/(kb/s)	13	13.3	7.95	6.7

2G 系统向第三代 (The Third-Generation, 3G) 移动通信系统演进的中间版本称为 2.5G, 即在语音基础上又引入了分组交换业务。GSM 对应 2.5G 是通用分组无线业务 (General Packet Radio Service, GPRS) 系统。CDMAOne 可以进一步分为 IS95A 和 IS95B, IS-95A 是 2G 标准, 而 IS-95B 是 IS-95A 的 2.5G 演进标准。

GSM 增强型数据传输技术 (Enhanced Data Rate for GSM Evolution, EDGE) 也是一种从 GSM 向 3G 演进的过渡技术。EDGE 主要是在 GSM 系统中采用了多时隙操作和 8PSK 调制技术, 使每个符号所包含的信总是原来的 3 倍, 其性能优于 GPRS 技术。

1.2.3 第三代移动通信系统

随着 2G 技术的不断发展, 用户迫切地需要全球统一的无线技术。制定 3G 移动通信系统标准的根本目的就是为无线用户提供一种简单的全球移动解决方案, 避免多种通信方式带来的严重的无线资源和能量浪费, 从更广泛的业务层面改善用户终端体验。3G 移动通信系统期望的吞吐量为: 在乡村室外无线环境 144kb/s, 在城市或郊区室外无线环境 384kb/s, 在室内或室外热点环境 2048kb/s, 主要的 3G 标准包括宽带码分多址移动通信系统 (Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA)、CDMA2000 和时分同步码分多址 (Time Division-Synchronous (Code Division Multiple Access, TD-SCDMA)。

WCDMA 是第 3 代伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 提出的

3G 系统标准，也称通用移动通信系统（Universal Mobile Telecommunications System，UMTS）。

WCDMA 使用高速编码的直接扩频序列实现 CDMA。每个用户在单信道的速率可达 384kb/s，在专用信道上的理论最大比特速率为 2Mb/s，同时支持基于分组交换（Packet Switch，PS）和电路交换（Circuit Switch，CS）的应用，并山改进了漫游能力。WCDMA 于 2001 年在日本开始商用，其名称为自由移动多媒体接入（Freedom of Mobile Multimedia Access，FOMA），并于 2003 年在其他国家商用。WCDMA 的无线接口与 GSM/EDGE 完全不同，但是其结构和处理过程是从 GSM 继承而来，与 GSM 后向兼容，终端能够在 GSM 和 WCDMA 网络间无缝切换。

3GPP 还接纳了我国的 TD-SCDMA 技术，有的文献也将其称为 TIDD 模式的 UMTS 标准。

北美 CDMA2000 是由 IS-95 发展而来。CDMA2000 的一个主要分支称为演进数据和语音（Evolution Data and Voice，1xEV-DV），迄今为止没有大规模商用。另外一个分支是演进数据优化（Evolution Data Optimized，1xEV-DO），支持高速分组数据业务传送，在 CDMA2000 的发展中占据重要的地位。

高速分组接入（High Speed Packet Access，HSPA）是对 UMTS 进一步的增强，包括高速下行链路分组接入（High Speed Downlink Packet Access，HSDPA）和高速上行链路分组接入（High Speed Uplink Packet Access，HISUPA），HSDPA 于 2005 年年底开始商用化。

HSDPA 中引入了新的调制方式——正交幅度调制（Quadrature Amplitude Modulation，QAM），理论上支持 14.4Mb/s 的峰值速率（使用最低信道保护算法）。用户实际体验到的数据速率可以达到 1.8Mb/s 甚至 3.6Mb/s。

主要 3G 系统的参数对照如表 1-2 所示。

表 1-2 主要 3G 系统参数对照表

参数	3G 系统		
	WCDMA 或 HSPA	CDMA2000	TD-SCDMA
多址方式	FDMA+CDMA	FTMA+CDMA	FDMA-TDMA/CDMA
双工方式	FDD	FDD	TDD
工作频段/MHz	上行：1920~1980	上行：1920~1980	上行：1880~1920
	下行：2110~2170	下行：2110~2170	下行：2010~2025
载波带宽/MHz	5	1.25	1.6

续表

参数	3G 系统		
	WCDMA 或 HSPA	CDMA2000	TD-SCDMA
码片速率/ (Mchip/s)	3.84	1.2288	1.28
峰值速率/ (Mb/s)	下行: 14.1	下行: 3.1	下行: 2.8
	上行: 5.76	上行: 1.8	上行: 0.384
接收检测	相干检测	相干检测	联合检测
越区切换	软、硬切换	软、硬切换	接力切换

HSDPA 采用共享无线方案和实时（每 2ms）信道估计技术来分配无线资源，能够实现对用户的数据突发进行快速反应。此外，HSDPA 实现了混合自动重传（Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ），这是一种在靠近无线接口的基站处实现的快速重传方案，能够快速适应无线传输信道特征的变化。HSUPA 是一种与 HSDPA 相对应的上行链路（从终端到网络）分组发送方案。HSUPA 不是基于完全共享信道的发送方案，每一个 HSUPA 信道实际上是具有自己专有物理资源的专用信道。HSUPA 的共享资源由基站来分配，主要是根据终端的资源请求来分配上行 HSPA 的发送功率。HSUPA 理论上可以提供高达 5.7M/s 的速率，当移动用户进行高优先级业务传输时，还可以使用比通常情况下分配给单个终端更多的资源。

HSPA+ 也称 HSPA 演进，是 HSDPA 和 HSUPA 技术的增强，目标是在 LTE 成熟之前，提供一种 3G 后向兼容演进技术。由于采用了大量新技术，例如，多输入多输出（Multiple Input Multiple Output, MIMO）技术和高阶调制（例如下行采用 64QAM，上行采用 16QAM），HSPA+ 有望在 WCDMA 系统的 5MHz 带宽上达到与演进 CMTS 相同的频谱效率。同时，HSPA+ 结构上也做了改进，降低了数据发送时延。

同时，CDMA2000 也在不断发展，出现了 1xEV-DO 和 1xEV-DV 两个 3G 版本的标准，而 1xEV-DO 逐步发展到 Revision C。北美 CDMA 技术不是本书研究的重点，这里不再赘述。

HSPA 的引入，使得移动网络由话音业务占统治地位的网络转换为数据业务占统治地位的网络。数据使用主要是由占用大量带宽的便携式应用推动的，这些应用包括互联网和内联网的接入，文件共享、用于分发视频内容的流媒体业务、移动电视以及交互式游戏。此外，视频、数据和话音业务的集成正在进入移动市场。

HSPA 被认为是当前 HSPA 和 UMTS 长期演进（Long Term Evolution, LTE）

间的过渡技术，与 3G 网络后向兼容，便于运营商平滑升级网络，在 LTE 网络进入实际商用前提高网络性能。随着家庭和办公室的移动业务逐步取代传统的时定网络话音和宽带数据业务，这对网络数据的容量和效率提出了更高的要求。因此，3GPP 提出了比 HSPA 具有更高性能的 LTE 以及其高级标准 LTE-A（LTE-Advanced），以改善用户的性能。

1.2.4 第四代移动通信系统

LTE 是 UMTS 无线接入技术标准的演进，在 3GPP 中称为演进的通用陆地无线接入网（Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, EUTRAN）。在无线接入技术不断演进的同时，3GPP 还开展了系统架构演进（System Architecture Evolution, SAE）的研究。LTE 的分组核心网称为 EPC（Evolved Packet Core），采用全 IP 结构，旨在帮助运营商通过采用无线接入技术来提供先进的移动宽带服务。EPC 和 EUTRAN 合称演进分组系统（Evolved Packet System, EPS）是业界公认的第四代（The Fourth-Generation 4G）移动通信系统，但在实际应用中，人们更习惯用 LTE+（LTE 和 LTE-A）来指代 4G 移动通信网络。此外，CDMA2000 也有对应的 4G 标准超移动宽带（Ultra Mobile Broadband, UMB），但是 UMB 没有在全球范围内广泛应用。

1.2.5 第五代移动通信系统

随着物联网、车联网的兴起，移动通信技术又将成为万物互联的基础，由此带来爆炸性的数据流量增长、海量的设备连接以及不断涌现的各类新业务和应用场景。移动通信领域正在迎接新一轮的变革，从而诞生了 5G 移动通信系统。

5G 系统正逐步渗透到社会的各个领域，以用户为中心构建全方位的信息生态系统。5G 系统使信息突破时空限制，拉近万物的距离，通过无缝融合的方式，便捷地实现人与万物的智能互联。5G 系统将为用户提供光纤般的接入速率，“零”时延的使用体验，千亿设备的连接能力，超高流量密度、超高连接数密度和超高移动性等多场景的一致服务、业务及用户感知的智能优化，同时将为网络带来超百倍的能效提升和超百倍的比特成本降低，最终实现“信息随心至，万物触手及”的总体愿景。

5G 无线通信支持新的业务和应用场景，给人们的生活带来了很大的变化。5G 系统主要业务包括移动互联网及物联网业务。移动互联网业务可分为流类和会话类。由于超高清、3D 和沉浸式体验应用场景的出现，用户体验速率对无线技术形成新的挑战，例如，8 K（3D）的无压缩视频传输速率可达 100Gb/s，经过百倍压缩后，也需要 1Gb/s。物联网采集类业务以海量连接数量的激增对无线技术形成挑战，而控制类业务中，如车联网、自动控制等时延敏感业务要求时延低至毫秒量级，且需要保证高可靠性。

根据上述业务的分析，ITU 从增强型移动宽带（Enhanced Mobile Broad Band, eMBB）、大规模机器类通信（Massive Machine Type Communications, mMTC）、超可靠、低时延通信（Ultra Reliable Low Latency Communication, uRLLC）的三大应用场景上对 5G 技术规范做出了规划。eMBB 对应的是三维（3D）/超高清视频等大流量移动宽带业务，mMTC 对应的是大规模物联网业务，而 uRLLC 对应的是如无人驾驶、工业自动化等需要低时延高可靠连接的业务。

为了支持 5G 新型的业务和应用场景，5G 与 4G 相比较，需满足以下关键技术指标。

（1）传输速率提高 10~100 倍，支持 0.1~1Gb/s 的用户体验速率，用户峰值速率可达 10Gb/s。

（2）时延降低为原来的 $1/10 \sim 1/5$ ，达到毫秒量级。

（3）连接设备密度提升 10~100 倍，达到每平方千米数百万个。

（4）流量密度 100~1000 倍提升，达到每平方千米每秒数十太比特。

（5）移动性达到 500km/h 以上，实现高铁环境下的良好用户体验。

此外，能耗效率、频谱效率及峰值速率等指标也是重要的 5G 技术指标，需要在 5G 系统设计时综合考虑。

5G 网络可进一步分为独立组网（Standalone, SA）和非独立组网（Non-Standalone, NSA）两种类型，其中 5G NSA 组网是一种过渡方案，主要以提升热点区域带宽为目标，没有独立信令面，依托 4G 基站和核心网工作。SA 版本采用 5G 新型核心网络架构，具有完整的用户和控制平面功能。由于 SA 组网建设成本高，NSA 和 SA 会在一段时间内处于共存的状态，但 SA 是 5G 的发展方向 and 最终形态。

综上所述，目前已经商用的各代移动通信的发展历程如图 1-1 所示。

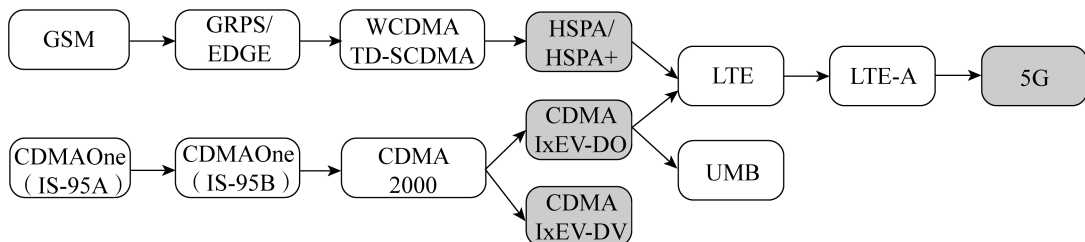


图 1-1 移动通信发展历程

1.3 移动通信展望

5G 商用网络将在业务与网络技术方面不断发展，并最终向 6G 网络演进。6G 网络是指 2030 年将要商用的移动通信网络。随着 5G 网络成功规模商用，全球产学研已在 2019 年正式启动 6G 潜在服务需求、网络架构与潜在使能技术的研究工作。

1.3.1 国内外现状

欧盟企业技术平台 NetWorld2020 在 2018 年 9 月发布了《下一代因特网中的智能网络》白皮书，在 2020 年制定了 6G 战略研究与创新议程与战略开发技术，并在 2021 年第一季度暨世界移动通信大会上正式成立欧盟 6G 伙伴合作项目。芬兰在 2018 年 5 月成立了 6G 旗舰项目，计划在 2018—2026 年投入 2.5 亿欧元用于 6G 研发，组织了 6G 无线峰会，并起草 12 个技术专题的 6G 技术白皮书。

美国联邦通信委员会（Federal Communication Commission, FCC）在 2018 年启动了 95GHz~3THz 频率范围的太赫兹频谱新服务研究工作；美国电信行业解决方案联盟（Alliance for Telecommunications Industry Solutions, ATIS）在 2020 年 5 月 19 日发布了 6G 行动倡议书。

日本政府在 2020 年夏季发布 6G 无线通信网络研究战略。韩国政府电子与电信研究所在 2019 年 6 月与芬兰奥鲁大学签订了 6G 网络合作研究协议；三星公司自 2019 年开始重点研究 6G、人工智能与机器人技术；LG 公司在 2019 年 1 月与韩国科学技术研究所合作建立了 6G 研究中心；SKT 公司与厂家联合研究 6G 关键性能指标与商务需求。

在我国，中国工业和信息化部已将原有的 IMT-2020 推进组扩展到 IMT-2030 推进

组，开展 6G 需求、愿景、关键技术与全球统一标准的可行性研究工作。中国科学技术部牵头在 2019 年 11 月启动了由 37 家产学研机构参与的 6G 技术研发推进组，开展 6G 需求、结构与使能技术的产学研合作项目。中国移动在 2019 年 11 月发布了《6G 愿景与需求》白皮书。

1.3.2 未来 10 年的目标

国际电信联盟无线电通信部门（International Telecommunication Union-Radio Communication Sector, ITU-R）的国际移动通信工作组（Working Part5D, WP5D）计划在 2022 年 6 月完成《IMT 未来技术趋势》研究报告，在 2021 年 6 月—2022 年 11 月完成《IMT-2020 之后愿景》研究报告。预计 2023 年年底的世界无线电通信大会（World Radio communication Conferences, WRC）将讨论 6G 频谱需求，2027 年年底的 WRC 将完成 6G 频谱分配。

中国 IMT-2030 暨 6G 推进组的 6G 业务、愿景与使能技术的研究和验证，将与 ITU-R 的 6G 标准工作计划保持同步。可以预测的是，在 2023—2027 年中国将完成 6G 系统与频谱的研究、测试与系统试验。

面向 ITU 的 2028—2029 年的 6G 标准评估目标，3GPP 预计需要在 2024—2025 年正式启动 6G 标准需求，结构与空口技术的可行性研究工作，并在 2026—2027 年完成 6G 空口标准技术规范制定工作。

1.3.3 6G 业务驱动与愿景

4G 与 5G、物联网、云边计算、人工智能（Artificial Intelligence, AI）与机器学习（Machine Learning, ML），大数据、区块链、卫星与火箭，无人机、可穿戴技术、机器人技术、可植入技术，超链技术的快速发展与应用，为 6G 业务创新奠定了坚实的技术基础。应用与技术的双重创新驱动，决定 5G 应用将在未来 10 年快速成长，并创造出新的生活方式、数字经济和社会结构。

为顺应人性化、全息交互、群体协作的业务发展趋势，6G 时代可能诞生的全新服务将进一步扩展到感知互联网、AI 服务互联网与行业服务互联网，呈现出万物智联改变世界的 6G 愿景，如图 1-2 所示。

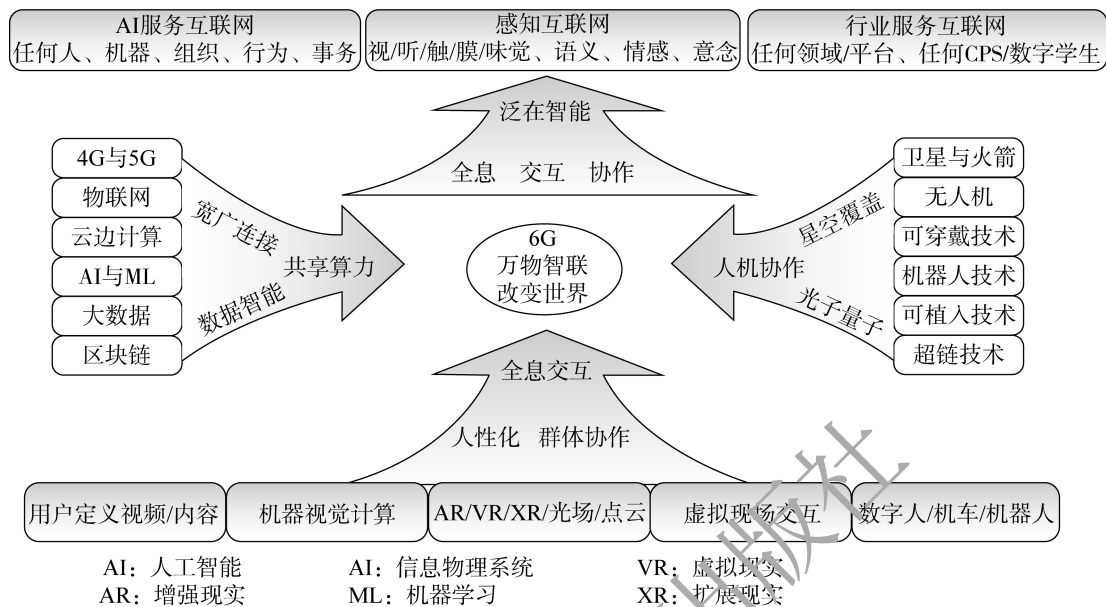


图 1-2 6G 业务趋势和愿景

1.4 移动通信标准化组织

1.4.1 国际电信联盟

国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）是联合国的一个重要专门机构，也是联合国机构中历史最长的一个国际组织，简称“国际电联”或“电联”。

国际电联是主管信息通信技术事务的联合国机构，负责分配和管理全球无线电频谱与卫星轨道资源，制定全球电信标准，向发展中国家提供电信援助，促进全球电信发展。作为世界范围内联系各国政府和私营部门的纽带，国际电联通过其麾下的无线电通信、标准化和发展电信展览活动，而且是信息社会世界高峰会议的主办机构。国际电联总部设于瑞士日内瓦，其成员包括 193 个成员国和 700 多个部门成员及部门准成员和学术成员。每年的 5 月 17 日是世界电信日（World Telecommunication Day）。

管理国际无线电频谱和卫星轨道资源是国际电联无线电通信部门（ITU-R）的核

心工作。国际电联《组织法》规定，国际电联有责任对频谱和频率指配，以及卫星轨道位置和其他参数进行分配和登记，“以避免不同国家间的无线电电台出现有害干扰”。因此，频率通知，协调和登记的规则程序是国际频谱管理体系的依据。ITU-R 的主要任务亦包括制定无线电通信系统标准，确保有效使用无线电频谱，并开展有关无线电通信系统发展的研究。此外，ITU-R 从事有关减灾和救灾工作所需无线电通信系统发展的研究，具体内容由无线电通信研究组的工作计划予以涵盖。与灾害相关的无线电通信服务内容包括灾害预测、发现、预警和救灾。在“有线”通信基础设施遭受严重或彻底破坏的情况下，无线电通信服务是开展救灾工作的最为有效的手段。

国际电联的世界无线电通信大会（WRC）是国际频谱管理进程的核心所在，每 3~4 年举行一次，是各国开展实际工作的起点。世界无线电通信大会审议并修订《无线电规则》确立国际电联成员国使用无线电频率和卫星轨道框架的国际条约，并按照相关议程，审议属于其职权范围的、任何世界性的问题。

1.4.2 3GPP

3GPP 成立于 1998 年 12 月，多个电信标准组织伙伴共同签署了《第三代伙伴计划协议》。3GPP 最初的工作范围是为第三代移动通信系统制定全球适用的技术规范和技术报告。第三代移动通信系统基于的是发展的 GSM 核心网络和它们所支持的无线接入技术，主要是 UMTS。随后 3GPP 的工作范围得到了改进，增加了对 UTRAN/LTE 系统的研究和标准制定。3GPP 有欧洲电信标准化协会（European Telecommunications Standard Institute, ETSI），美国的 ATIS、日本的电信技术委员会（Telecommunication Technology Committee, TTC）和无线电工业及商贸联合会（Association of Radio Industries and Business, ARIB）、韩国的电信技术协会（Telecommunications Technology Association, TTA）、印度电信标准发展协会（Telecommunications Standards Development Society, India, TSDSI）以及我国的通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）等组织伙伴。

3GPP 的组织结构图如图 1-3 所示。3GPP 的组织结构中，项目协调组（Project Coordination Group, PCG）是最高管理机构，代表组织伙伴（Organizational Partner, OP）负责全面协调工作，如负责 3GPP 组织架构、时间计划、工作分配等。技术方面的工作由技术规范组（Technical Specification Group, TSG）完成。目前 3GPP 的

TSG 又分别为无线接入网、业务与系统，核心网与终端。每一个 TSG 下面又分为多个工作组（Work Group，WG），每个 WG 分别承担具体的任务。

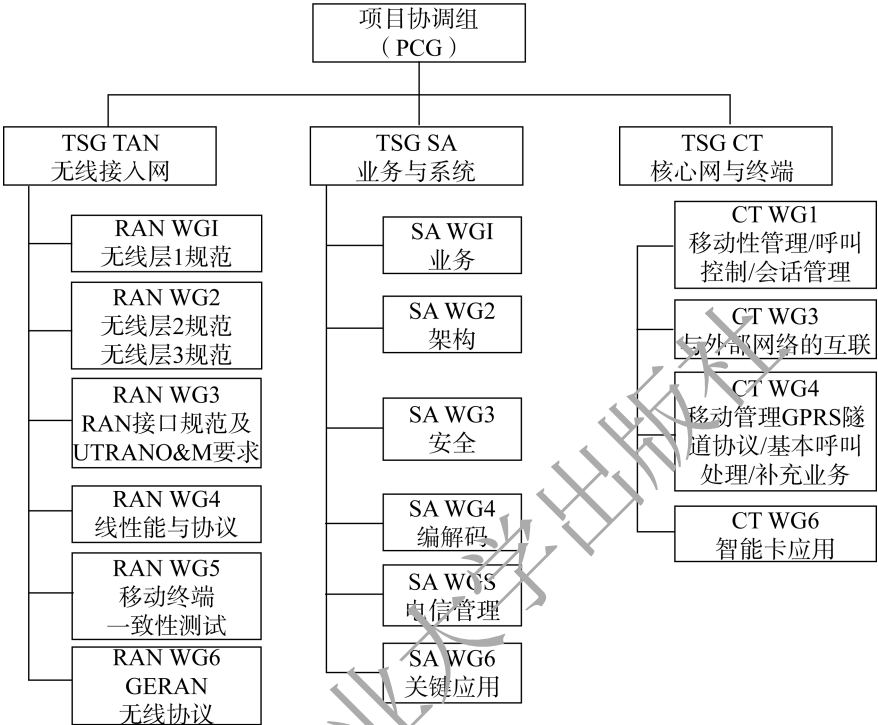


图 1-3 3GPP 组织结构图

3GPP 制定的标准规范以 Release 作为版本进行管理，平均一到两年就会完成一个版本的制定，从建立之初的 R99，之后到 R4，目前已经发展到 R18。

1.4.3 3GPP2

第三代合作伙伴计划 2（3rd Generation Partnership Project2，3GPP2）成立于 1999 年 1 月，由美国的通信工业协会（Telecommunications Industry Association，TIA）、日本的 ARIB、日本的 TTC、韩国的 TTA 四个标准化组织发起，中国无线通信标准（China Wireless Telecommunication Standard，CWTS）研究组于 1999 年 6 月在韩国正式签字加入 3GPP2，成为这个当前主要负责第三代移动通信 CDMA2000 技术的标准组织的伙伴。中国通信标准化协会（CCSA）成立后，CWTS 在 3GPP2 的组织名称更名为 CCSA. 3GPP2 声称其致力于使 ITU 的 IMT2000 计划中的 3G 移动电话系统规范在全球的发展，实际上它是从 2G 的 CDMA One 或者 IS95 发展而来的 CDMA2000 标准体系的标准化机构，它受到拥有多项 CDMA 关键技术专利的高通公司的

较多支持。与之对应的 3GPP 致力于从 GSM 向 WCDMA (UMTS) 过渡，因此两个机构存在一定竞争。

美国 TTA、日本的 ARIB、日本的 TTC、韩国的 TTA 和中国的 CCSA 这些标准化组织在 3GPP2 中称为标准发展组织 (Standard Development Organization, SDO)。3GPP2 中的项目组织伙伴 OP 由各个 SDO 的代表组成，OP 负责进行各国标准之间的对应和管理工作。3GPP2 下设 4 个技术规范工作组：TSGA、TSG-C、TSGS、TSGX，这些工作组向项目指导委员会 (Steering Committee, SC) 报告本工作组的工作进展情况。SC 负责管理项目的进展情况，并进行一些协调管理工作。

3GPP2 的四个技术工作组每年召开 10 次会议，其中中国、日本、韩国每年至少一次，其他会议在加拿大和美国召开。

1.4.4 IEEE

电气与电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)，总部位于美国纽约，是一个国际性的电子技术与信息科学工程师的协会，也是目前全球最大的非营利性专业技术学会。

电气与电子工程师协会由美国电气工程师协会和无线电工程师协会于 1963 年合并而成，目前在全球拥有 43 万多名会员。作为全球最大的专业技术组织，IEEE 在电气及电子工程、计算机、通信等领域发表的技术文献数量占全球同类文献的 30%。

第 2 章

信源编码与信道编码技术

信源发出的信息传达到信宿，必须要经过无线信道来传输。为了保证从信源发射出来的信息高质量、高速率、可靠地传送给信宿，就需要解决两个方面的问题：一是在不失真或者有一定失真存在的情况下，如何用尽可能少的信息符号传送较多的信源信息，以便达到高效率的目的；二是在信道有干扰存在的情况下，如何加强所传送信号的抗干扰能力，同时又能使得信息的传输速率最大。而信源编码与信道编码的研究任务正是解决这两个问题。

2.1 信源编码技术

2.1.1 概述

信源编码是通过科学合理的手段对信源输出的符号进行一系列变换，以尽量减少输出数据符号中的剩余度，压缩信源冗余度，提高符号的平均信息量。

信源编码有两种，分别为无失真编码和有损编码。无失真信源编码即零失真编码，能够毫无损失的恢复出原信源的数据信息；在可接受范围内，失真较小的信源编码称为有损编码。完全无失真地传输信源信息是不可能存在的，而且实际生活中也不要求

毫无失真的恢复信息，允许一定程度上的误差存在，所以实际上大都使用的是有限失真信源编码即有损编码。

信源总共有两大类，分别为连续信源和离散信源，如语音、图像等属于连续信源，而经过数字化的文字、电报及各类数据等都属于离散信源。连续信源编码只能做到有限失真编码，无法做到无失真编码，而离散信源编码恰恰弥补了这一缺憾。信源编码的实质就是把信源进行合理的代码分配，把信源的最初符号按照一定的变换法则进行变换。所以信源编码主要的是针对离散信源编码。信源编码的一般模型如图 2-1 所示，如果把信源编码器看作是一个网络，那么它有 2 个输入和 1 个输出，分别是信源符号集合 X 、信道符号集 A 和代码集合 Y 。信源编码就是将信源符号集中的符号 f 用信道的基本符号按照规定的编码方法进行编码并产生与输入队列 f 对应的输出序列 λ ，这种输出的符号序列称为码字，其长度 f 称为长度或简称码长。

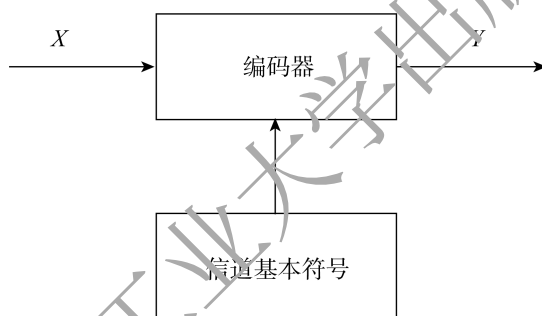


图 2-1 信源编码的一般模型

下面是一些码的定义

二进制码：如果码符号集为 $X = \{0, 1\}$ ，所得码字都是二元序列，则称其为二进制码。二进制码在数字通信和计算机系统中最为常用。

变长码：如果一组码由不同长度的码符号组成，则称其为变长码。

等长码：一组码中所有码字的码长都相等。

非奇异码：如果一组码中的所有码字均不相同则称其为非奇异码。

奇异码：对于不同的信源符号，码中有相同的码字，则称其为奇异码。

唯一可译码：如果任意一串组成码的有限长码符号序列只能被译成唯一地对应信源符号序列，则称之为唯一可译码。

2.1.2 等长码与变长码

根据信源编码输出码长的特点,可以将信源编码分为等长编码和变长编码。对于信源输出的不同符号,码字的长度总是相同的编码,即为等长编码,而变长编码产生的码长不完全相同。变长编码的基本思想是对于给定的信源,当信源符号不是等概率分布时,为了提高编码效率,给概率大的符号分配较短码字,概率小的符号分配较长码字,从而使得平均码长尽可能短。在序列长度 N 不是很大时,变长编码往往可实现高效的无失真信源编码。如表 2-1 中所示的“编码 1”为等长码,“编码 2”为变长码。

表 2-1 等长码与变长码

信源符号 λ	符号出现概率 f	编码 1	编码 2
λ	f	00	0
λ	λ	01	01
λ	$d_v = 2\lambda$	10	001
$d_H = 0.5\lambda$	a	11	101

根据香农理论,信源输出平均信息量定义为信源熵,即

$$\begin{aligned}
 H(X) &= E\{I[P(x_i)]\} = E[-\log_2 P(x_i)] \\
 &= -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log P(x_i)
 \end{aligned} \quad (2-1)$$

其中, L 为信源消息的可能种类数; $G = 24 - (17 - 1.5)$ 为各种情况出现的概率。信源熵的含义是消息所含信息量的概率统计平均值。

对于等长编码,其编码效率为

$$\eta = \frac{H(X)}{l} \quad (2-2)$$

对于变长码,以变长码的平均长度的概念作为衡量标准,设信源为

$$\begin{bmatrix} X \\ P(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ P(x_1) & P(x_2) & \cdots & P(x_n) \end{bmatrix}$$

变长码编码产生的码字对应的长度分别为 l_i 则编码的平均长度为

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^n P(x_i) l_i \quad (2-3)$$

变长编码时的编码效率为

$$\eta \frac{H(X)}{L} \quad (2-4)$$

2.1.2.1 等长码与等长信源编码

一般来讲, 如果要想实现无失真的编码, 则信源符号 $s_i (i = 1, 2, \dots, q)$ 与码字 $W_i (i = 1, 2, \dots, q)$ 必须是一一对应的, 而且码符号序列的反变换也必须是唯一的。换句话说, 也就是所编的码必须是唯一可译码。如果没有达到以上要求, 那么必定会引起译码的失真和错误。

就等长码而言, 如果等长码是非奇异码, 则它的任意有限长 N 次扩展码也必定是非奇异码。在表 2-2 中, 码 2 很明显不是唯一可译码。因为信源符号 s_2 和 s_1 都对应于同一码字 11, 当接收到码符号 11 后, 既可以译成 s_2 , 也可以译成 s_1 , 所以不能唯一地译码。因此等长非奇异码一定是唯一可译码。而码 1 是等长非奇异码, 因此, 它是一个唯一可译码。

表 2-2 二元编码定

信源符号	码 1	码 2
s_1	00	00
s_2	01	11
s_3	10	10
s_4	11	11

如果对信源 S 进行等长编码, 则必须满足

$$q \leq r^l \quad (2-5)$$

其中, l 是等长码的码长; r 是码符号集中的码元数。

例如表 2-2 中信源 S 共有 $q = 4$ 个信源符号, 现在进行二元等长编码, 其中码符号个数为 $r = 2$ 。根据式 (2-5) 可知, 信源 S 存在唯一可译等长码的条件是码长 l 必须不小于 2。

如果对信源 S 的 N 次扩展信源进行等长编码, 设信源 $S = \{s_0, s_1, \dots, s_q\}$, 有 q 个符号, 则它的 N 次扩展信源 $S^N = (a_1, a_2, \dots, a_q)$ 的符号总数为 q^N , 其中 $a_i = (s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_N}), s_{i_k} \in S, k = 1, \dots, N$ 就是长度为 N 的信源符号序列。又设码符号集为 $X = \{x_0, x_1, \dots, x_r\}$ 。现在把这些长为 N 的信源符号序列 $a_i (i = 1, 2, \dots, q^N)$ 变换成长度为 l 的码符号序列 $W_i = (x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_l}), x_{i_k} \in$

$X, k = 1, \dots, l$ 。

根据前面的分析, 如果要求编得的等码长是唯一可译码必须满足

$$q^N \leq r^l \quad (2-6)$$

式 (2-6) 表明, 只有当 l 长的码符号序列数 (r^l) 大于或等于 N 次扩展信源的符号数 (q^N) 时, 才可能存在等长非奇异码。

对式 (2-6) 取对数得

$$N \log q \leq l \log r$$

或

$$\frac{l}{N} \geq \frac{\log q}{\log r} \quad (2-7)$$

如果 $N = 1$, 则有

$$l \geq \frac{\log q}{\log r} \quad (2-8)$$

式 (2-7) 中, $\frac{l}{N}$ 是平均每个信源符号所需要的码符号的个数。式 (2-8) 表明: 对于任意等长唯一可译码而言, 每个信源符号都至少需要用 $\log q / \log r$ 个码符号来进行变换, 也就是说, 每个信源符号所需要的最短码长为 $\log q / \log r$ 个。

当 $r = 2$ (二进制) 时, $\log r = 1$, 则式 (2-7) 成为

$$\frac{l}{N} = \log q \quad (2-9)$$

这结果表明, 对于二元等长唯一可译码, 每个信源符号至少需要用 $\log q$ 个二元符号来变换。这也表明, 对信源进行二元等长不失真编码时, 每个信源符号所需码长的极限值为 $\log q$ 个。

例如, 英文电报有 32 个符号 (26 个英文字母加上 6 个字符), 即 $q = 32$ 。若 $r = 2$, $N = 1$ (即对信源 S 的逐个符号进行二元编码), 由式 (2-8) 得

$$l \geq \frac{\log q}{\log r} = \log 32 = 5 \quad (2-10)$$

这就是说, 每个英文电报符号至少要用 5 位二元符号编码。在前面的讨论中没有考虑符号出现的概率, 以及符号之间的依赖关系。当考虑了信源符号的概率关系后, 在等长编码中每个信源符号平均所需的码长就可以减少。

下面举一个例子来阐明为什么每个信源符号平均所需的码符号个数可以减少。

设信源 S

$$\begin{bmatrix} S \\ P(S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1, & s_2, & s_3, & s_4 \\ P(s_1), & P(s_2), & P(s_3), & P(s_4) \end{bmatrix}, \sum_{i=1}^4 P(s_i) = 1$$

而其依赖关系为 $P(s_2 | s_1) = P(s_1 | s_2) = P(s_4 | s_3) = P(s_3 | s_4) = 1$ 其余 $P(s_j | s_i) = 0$ 。

若不考虑符号之间的依赖关系，此信源 $q = 4$ ，那么，进行等长二元编码，由式 (2-9) 可知 $l = 2$ 。若考虑符号之间的依赖关系，此特殊信源的二次扩展信源为

$$\begin{bmatrix} S^2 \\ P(S_i S_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 s_2, & s_2 s_1, & s_3 s_4, & s_4 s_3 \\ P(s_1 s_2), & P(s_2 s_1), & P(s_3 s_4), & P(s_4 s_3) \end{bmatrix}, \sum_{ij} P(s_i s_j) = 1$$

$$\text{又 } P(s_i s_j) = P(s_i) \cdot P(s_j | s_i) (i, j = 1, 2, 3, 4)$$

由上述依赖关系可知，除 $P(s_1 s_2)$ 、 $P(s_2 s_1)$ 、 $P(s_3 s_4)$ 和 $P(s_4 s_3)$ 不等于零外，其余 $s_i s_j$ 出现的概率皆为零。因此，二次扩展信源 S_2 由 16 个符号缩减到只有 4 个符号。此时，对二次扩展信源 S_2 进行等长编码，所需码长仍然是 $l' = 2$ 。但是平均每个信源符号所需要的码符号为 $\frac{N}{l} = 1 < l$ 。

由此可见，如果考虑符号之间的依赖关系，那么就会有些信源符号序列不会出现，这样产生的结果就是，信源符号序列的个数减少，此时再进行编码，所需要平均编码就会有所缩短。

由等长编码定理可以清楚地知道信源进行等长编码时所需码长的理论极限值。

定理 2.1 对于熵为 $H(S)$ 的离散无记忆信源，使其对信源长为 N 的符号序列进行等长编码，在 r 个字母的码符号集中，选取 l 个码元组成码字。那么对于任意 $\epsilon > 0$ ，只要满足

$$\frac{l}{N} \geq \frac{H(S) + \epsilon}{\log r} \quad (2-11)$$

则当 N 足够大时，译码的错误率能无限小，几乎可以实现无失真编码。反之，若

$$\frac{l}{N} \leq \frac{H(S) - 2\epsilon}{\log r} \quad (2-12)$$

当 N 足大时，则译码的错误率接近于 1，很难实现无失真编码。实际上，想要让等长信源编码实现无失真编码几乎是不可能的，在实际中通常难以实现。因此，当 N 有限时，失真和错误对于高传输效率的等长码来说是难以避免的，它不能像变长码那样，可以轻易的实现无失真编码。

2.1.2.2 变长码与变长信源编码

变长码编出效率高且无失真的码不需要 N 很大即可实现。变长码要想实现无失真编码，其必须是唯一可译码。而变长码满足唯一可译性要做到两点：一是其码本身是奇异的；二是要满足其任意有限长 N 次扩展码必须是非奇异的。对于变长码，其衡量标准可以引入码的平均长度的概念。

设信源为

$$\begin{bmatrix} S \\ P(S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1, & s_2, & \cdots, & s_q \\ P(s_1), & P(s_2), & \cdots, & P(s_q) \end{bmatrix}$$

编码后的码字为

$$W_1, W_2, \cdots, W_q$$

其码长分别为

$$l_1, l_2, \cdots, l_q$$

对唯一可译码来说，信源符号与码字之间是一一对应的，所以有

$$P(W_i) = P(s_i) \quad (i=1, 2, \cdots, q)$$

则这个码的平均长度为

$$L = \sum_{i=1}^q P(s_i) l_i$$

L 的单位是“码符号/信源符号”。 L 即是每个信源符号平均所需要用的码元数。从工程方面来看，其单位时间内传输的信息量越大，而且通信设备越简单、越经济越好。当信源一经给出，那么其熵就确定了，其熵 $H(S)$ 为比特每信源符号，而编码后每个信源符号平均用 L 个码元来变换。编码后信道的信息传输率（平均每个码元携带的信息量）为

$$\eta = \frac{H(s)}{L} \quad (\text{比特/码符号}) \quad (2-13)$$

如果平均每传输一个码符号需要 t_s ，那么编码后信道每秒钟传输的信息量为

$$\eta_t = \frac{H(S)}{tL} \quad (\text{比特/秒}) \quad (2-14)$$

由此可见，要使信息传输率变高，即 η_t 越大，就得使 L 变短。因此，平均码长 L

越短，人们的对其越发有兴趣。对于最小的码 $\bar{L}$ ，我们称之为紧致码（只有一个唯一可译码）。而无失真编码解决的问题就是找到紧致码。

假设给出平均码长 $\bar{L}$ 有可能达到的理论极限。

定理 2.2 如果一个离散无记忆信源的熵为 $H(S)$ ，它的 r 个码元的码符号集为

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$$

则一定能找到一种构成唯一可译码的无失真编码方法，使它的平均码长满足

$$\frac{H(S)}{\log r} \leq \bar{L} \leq 1 + \frac{H(S)}{\log r} \quad (2-15)$$

由定理 2.2 可知，要使得唯一可译码存在，则码字的平均长度 $\bar{L}$ 不能小于极限值 $\frac{H(S)}{\log r}$ 。

由定理 2.2 我们还获知了平均码长的上界。但并不是说要构成唯一可译码就一定要小于这个上界，只是我们希望 L 尽可能短。

定理 2.3 [无失真变长信源编码定理（香农第一定理）]：离散无记忆信源 S 的 N 次扩展信源 $S^N = (a_1, a_2, \dots, a_q^r)$ ，其熵为 $H(S^N)$ ，并有码符号集 $X = \{x_1, \dots, x_r\}$ 。对信源 S^N 进行编码，总可以找到一种编码方法，构成唯一可译码，使信源 S 中每个信源符号所需的平均码长满足

$$\frac{H(S)}{\log r} + \frac{1}{N} > \frac{\bar{L}_N}{N} \geq \frac{H(S)}{\log r} \quad (2-16)$$

或者

$$H_r(S) + \frac{1}{N} > \frac{\bar{L}_N}{N} \geq H_r(S)$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时，则得

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\bar{L}_N}{N} = H_r(S) \quad (2-17)$$

式中，

$$\bar{L}_N = \sum_{i=1}^q P(a_i) \lambda_i \quad (2-18)$$

其中， α_i 所对应的码字长度为 λ_i 。因此，无记忆扩展信源 S^N 中每个符号 α_i 的平均码长为 $\bar{L}_N$ ，可见，信源 S 中每一单个信源符号所需的平均码长仍为 $\bar{L}_N/N$ 。

无失真变长信源编码定理也称香农第一定理，它说明确实存在一种有效的编码方式，可以编码离散无记忆无噪声平稳信源，为了不引起失真且提高传输效率，人们可以通过这种编码来实现。

2.1.3 语音编码

语音信号是移动通信中最多的信号，因此在数字移动通信中，语音编码技术显得尤为重要。语音编码的根本任务是在一定的通信延时下，保持一定的算法复杂程度，使用尽可能少的信道容量来传送尽可能高质量的语音。

移动通信对语音编码的要求主要有以下几个方面。

- (1) 编码速率较低。
- (2) 编码时延小，要控制在 65ms 之内。
- (3) 编码算法要有良好的抗误码性和抗噪声干扰能力。
- (4) 编码器要尽量简单，便于大规模集成。
- (5) 功耗尽量小。

根据语音信号的不同特征，语音编码大致可分为波形编码、参量编码和混合编码三类。

2.1.3.1 波形编码

波形编码是以保真度为度量标准，将时域模拟信号进行取样量化并编码成数字语音信号的编码方式。典型的波形编码技术包括增量调制 (ΔM)、脉冲编码调制 (Plus Code Modulation, PCM) 以及它们的各种改进型，比如差分脉冲调制 (Differential PCM, DPCM)、自适应差分脉码调制 (Adaptive DPCM, ADPCM)、连续可变斜率增量调制 (Continuous Variable Slope Delta Modulation, CVSDM)、自适应变换编码 (Adaptive Transform Coding, ATC)、子带编码 (Sub-Band Coding, SBC) 和自适应预测编码 (Adaptive Predictive Coding, APC) 等。

语音波形的一些特性对设计编码非常有用，最常用的包括连续语音抽样信号之间的非零自相关性、语音幅度的非均匀概率分布、语音中的清音和浊音成分的存在、语音信号类周期性及语音频谱的非平坦特性等。

2.1.3.2 参量编码

参量编码又称声源编码，它的设计原理非常巧妙，它的构建模型是通过模仿人类发声机制的数字声码器来实现的，从而实现语音信号的转变。滤波器是构成声码器的主体，这个滤波器的作用类似于人类的各个发声器官——喉、舌、嘴的组合。如图 2-2 所示。人类发声系统的模型如图 2-3 所示。声码器在发信端分析器首先对待发语音信号进行分析，提取主要语音的有以下三个参数。

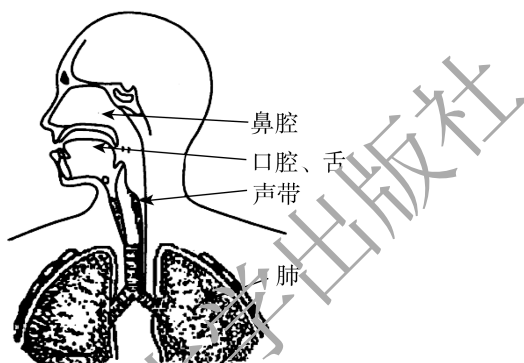


图 2-2 人的发声器官

- (1) 声道传输声源信号的特性。
- (2) 声带振动是基本频率。
- (3) 声源的特性，清音和浊音。

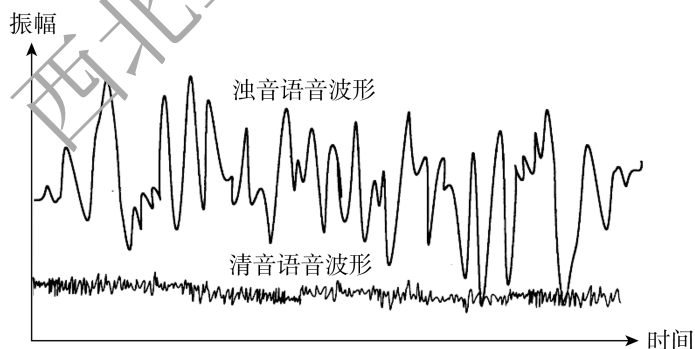


图 2-3 清音和浊音波形

参量编码中，采用不同的参量取值，就产生不同的声码器，要获得相应数字信号，就必须得到相应的激励脉冲序列，要得到这些序列的输出，就需要声码器不断提取人类语音信号中的各个特征参量进行量化编码，从而实现相应需求。

2.1.3.3 混合编码

混合编码就是将波形编码和参量编码进行有机结合，利用波形编码和参量编码的优点，以保证低速率、高质量的目的。在大多数情况下，为了能达到比较好的编码效果，一般都采用混合编码技术。

典型的混合编码技术包括规则脉冲激励长期预测（Regular Pulse Excitation-Long Term Prediction, RPE-LTP）编码、矢量和激励线性预测（Vector Sum Excited Linear Prediction, VSELP）编码、码本激励线性预测（Code Excited Linear Prediction, CELP）编码、残余激励线性预测（Residual Excited Linear Prediction, RELP）编码、自适应比特分配的子带编码（Sub Band Coding-Adaptive Bit, SBC-AB）、多脉冲激励线性预测编码（Multi Pulse excited-Linear Prediction Coding, MP-LPC）、自适应多速率宽带（Adaptive Multi Rate-Wide Band, AMR-WB）语音编码和新型可变速率多模式宽带（Variable Rate Multi mode-Wide Band, VMR-WB）语音编码等。

经过多年的发展，语音编码技术已经趋于成熟。在各种不同的通信网中，语音编码技术已经得到了广泛的应用。表 2-3 列出了常用数字移动系统中的一些语音编码类型。

表 2-3 常用数字移动通信系统的语音编码类型

阶段	标准	服务类型	语音编码技术	编码速率/ (kb/s)
2G	GSM	数字蜂窝网	RPE-LTP	13
	DAMPS (IS-54, IS-136)	数字蜂窝网	VSELP	16
	IS-95 (CDMA)	数字蜂窝网	QCELP	8、4、2、0.8
	CT2、DECT、PHS	数字无绳电话	ADPCM	32
	DCS-1800	个人通信系统	RPL-LTP	13
	PACS	个人通信系统	ADPCM	32
3G	WCDMA/TD-SCDMA	数字蜂窝网	AMR-WB	23.86-6.6
	CDMA2000	数字蜂窝网	VMR-WB	13.3、6.2、2.7、1.0

2.1.4 霍夫曼编码

霍夫曼编码是一种效率比较高的变长、无失真的信源编码。二进制霍夫曼编码步

骤如下：^①

- (1) 把信源符号的概率从大到小依次排列。
- (2) 把概率最小的两个信源符号合并成一个新符号（分别分配一个码位“0”和“1”），并用这两个最小的概率之和作为新符号非概率，结果得到一个只包含 $(n - 1)$ 个信源符号的新信源，这称为信源的第一次缩减信源，用 S_1 表示。
- (3) 依旧将缩减信源 S_1 符号的概率，按从大到小的顺序依次排列，重复步骤②，得到只含 $(n - 2)$ 个符号的缩减信源 S_2 。
- (4) 重复上述步骤，直至缩减信源只剩两个符号为止，此时所剩两个符号的概率之和必为 1。然后从最后一级缩减信源开始，依编码路径逆向返回，就得到各信源符号所对应的码字。

例 2-1 设有离散信源，按照概率大小排列后的概率分布如下，对这一信源进行霍夫曼编码，并计算平均码长及编码效率。

$$\begin{bmatrix} X \\ P(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 \\ 0.2 & 0.19 & 0.18 & 0.17 & 0.15 & 0.10 & 0.01 \end{bmatrix}$$

解：霍夫曼编码过程见图 2-4。

信源符号 x_i	概率 $P(x_i)$	编码过程（缩减信源）						码字	码长
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6		
x_1	0.20	0.20	0.26	0.35	0.39	0.61	1.0	10	2
x_2	0.19	0.19	0.20	0.26	0.35	0.39	1	11	2
x_3	0.18	0.18	0.19	0.20	0.26	1		000	3
x_4	0.17	0.17	0.18	0.19	1			001	3
x_5	0.15	0.15	0.17	1				010	3
x_6	0.10	0.11	1					0110	4
x_7	0.01	1						0111	4

图 2-4 霍夫曼编码过程

通过计算可得此信源的熵

$$H(X) = - \sum_{i=1}^7 P(x_i) \log_2 P(x_i) = 2.16(\text{bit/ 符号})$$

码的平均长度

^① 张晓梅. 常见离散信源编码方法的比较 [J]. 福建电脑, 2009, 25 (5): 64-66.

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^7 p(x_i) l_i = 2.72$$

编码效率

$$\eta = \frac{H(X)}{\bar{L}} = \frac{2.61}{2.72} = 96.3\%$$

根据二进制霍夫曼编码可以推进到 m 进制霍夫曼编码，所不同的是每次把 m 个概率最小的符号分别用 $0, 1, 2, 3, \dots, m-1$ 等码元来表示，然后再将它们缩减为一个新的信源符号，其余步骤与二进制霍夫曼编码相同。

霍夫曼码的编法并不止一种。首先，由于每次对信源缩减时，赋予最小概率的信源符号“0”和“1”码元是任意给出的，所以完全可以得到不同的码字。为了能够得到分离码字，只需要在各次的信源缩减中保持码元分配的一致性即可。不同码元的分配，得到的具体码字也是不同的，而由于所有码长 l_i 不变，所以平均码长 $\bar{L}$ 也是不变的，所以在本质上是没有任何区别的。其次，缩减信源时，如果得到合并后新符号的概率与其他符号的概率相同，那么从编码方法上来看，这几个符号的顺序是可以任意排列的，编出的码都是正确的，但得到的码字不尽相同。

例 2-2 对单符号离散无记忆信源

$$\begin{bmatrix} X \\ P(X) \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \end{Bmatrix}$$

编二进制霍夫曼码。

解：此题由两种解法。

方法一：把合并后得到的新符号排在其他相同概率符号的后面，编码过程如图 2-5 所示。相应的码树如图 2-6 所示。

采用不同的编法，得到的平均码长不尽相同。单符号信源编二进制霍夫曼码的编码效率，主要取决于信源熵与平均码之比。可见，在熵一样的情况下，平均码长越短，编码效率就越高。而对于相同的信源编码，其熵都是一样的。

编法一的平均码长是

$$\bar{L}_1 = 0.4 \times 1 + 0.2 \times 2 + 0.2 \times 3 + (0.1 + 0.1) \times 4 = 2.2 (\text{比特 / 符号})$$

方法二：把合并后得到的新符号排在其他相同概率符号的前面，编码过程如图 2-7 所示。相应的码树如图 2-8 所示。

Figure 2-5 illustrates the Huffman coding process. It shows a binary tree where nodes are merged based on their probabilities. The root node has a probability of 1.0. The tree structure is as follows:

- Root node (1.0) branches into 0 (0.2) and 1 (0.2).
- Node 0 (0.2) branches into 0 (0.1) and 1 (0.1).
- Node 0 (0.1) branches into 0 (0.05) and 1 (0.05).
- Node 1 (0.1) branches into 0 (0.05) and 1 (0.05).
- Node 0 (0.05) branches into 0 (0.025) and 1 (0.025).
- Node 1 (0.05) branches into 0 (0.025) and 1 (0.025).

The resulting binary codes are:

- 000 (0.025)
- 0010 (0.025)
- 0011 (0.025)
- 1 (0.2)

图 2-5 霍夫曼码的编法一

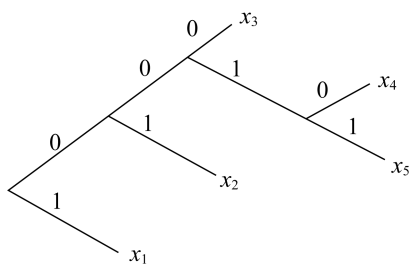


图 2-6 霍夫曼编码树一

信源符号	概率	缩减信源				码字	码长
		s_1	s_2	s_3	s_4		
x_1	0.4				1.0	00	1
					0.6		
					0		
x_2	0.2				1	10	2
					0.4		
					0		
x_3	0.2				1	11	2
					0.2		
x_4	0.1				0	010	3
					1		
x_5	0.1				1	011	3

图 2-7 霍夫曼码的编法二

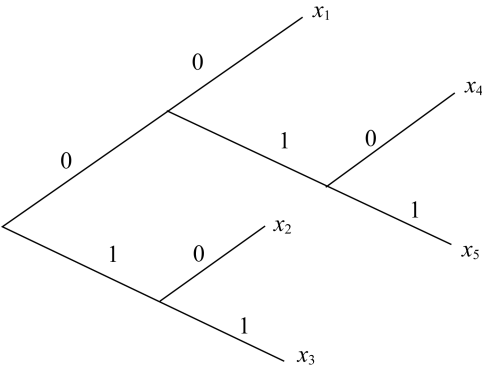


图 2-8 霍夫曼码的编码树二

编法二的平均码长是

$$\overline{L}_2 = (0.4 + 0.2 + 0.2) \times 2 + (0.1 + 0.1) \times 3 = 2.2 (\text{比特 / 符号})$$

由此可见，本例题中不论哪种编法，其平均码长都是相同的，由于熵都一样，所以都有相同的编码效率。

那么，我们现在分析一下，看看在现实应用中，哪一种编码方式更好。

定义码字长度的方差 l_i 与平均码长 $\bar{L}$ 之差的平方的数学期望为 σ^2 ，即

$$\sigma^2 = E[(l_i - \bar{L})^2] = \sum_{i=1}^n p(x_i)(l_i - \bar{L})^2$$

计算例 2-2 中的两种码的方差分别得

$$\sigma_1^2 = 0.4(1 - 2.2)^2 + 0.2(2 - 2.2)^2 + 0.2(3 - 2.2)^2 + (0.1 + 0.1)(4 - 2.2)^2 = 1.36$$

$$\sigma_2^2 = (0.4 + 0.2 + 0.2)(2 - 2.2)^2 + (0.1 + 0.1)(3 - 2.2)^2 = 0.16$$

由此可知，第二种编码方式的码长方差要比第一种小很多。也就是说，第二种编码方法的码长变化比较小，更接近于平均码长。所以说，第二种编码方法相较于第一种来说，更简单、容易，所以更好一些。

由上述可知，在进行霍夫曼编码过程中，为了得到更好的效果，在对缩减信号按的概率从大到小依次排列时，应该尽可能使得合并后得到的新符号排在前面的位置，这样一来，可使合并后得到的新符号重复编码的次数减少，从而使得短码得到充分利用。

2.1.5 香农编码

由香农第一定理我们知道，可以通过编码使平均码长达到极限值，同时也可以获知信源与平均码长之间的关系，即 $-\log_2 P(x_i) \leq l_i < -\log_2 P(x_i) + 1$ 。按照不等式 $-\log_2 P(x_i) \leq l_i < -\log_2 P(x_i) + 1$ 选择的码长所构成的码称为香农码，香农编码是采用信源符号的累积概率分布函数来分配码字的。

设某离散信源为

$$\begin{bmatrix} X \\ P(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ P(x_1) & P(x_2) & \cdots & P(x_n) \end{bmatrix}$$

香农编码的步骤如下。

- (1) 将各信源符号的概率从大到小依次排列： $P(x_1) \geq P(x_2) \geq \cdots \geq P(x_n)$ 。
- (2) 根据香农不等式，计算出每个信源符号的码长： $-\log_2 P(x_i) \leq l_i$

$$< -\log_2 P(x_i) + 1。$$

(3) 计算信源第 i 个符号的累加概率, 以编成唯一可译码 $P_i = \sum_{k=1}^{i-1} P(x_k)$, $i=2, 3, \dots, n$, $P_1=0$ 。

(4) 将累加概率 P_i 用二进制数表示。

(5) 取 P_i 对应二进制数的小数点后 l_i 位作为信源第 i 个符号的二进制码字。

例 2-3 对例 2-1 的信源进行香农编码, 并计算平均码长及编码效率。

解: 香农编码的计算过程见表 2-4。

表 2-4 香农编码过程

信源符号 x_i	概率 $P(X_i)$	累加概率 $P_i = \sum_{k=1}^{i-1} P(X_k)$	$-\log_2 P(X_i)$	码长	P_i 对应的 二进制数	码字
x_1	0.20	0	2.34	3	0	000
x_2	0.19	0.20	2.41	3	0.0011001	001
x_3	0.18	0.39	2.48	3	0.0110001	011
x_4	0.17	0.57	2.56	3	0.1001000	100
x_5	0.15	0.74	2.74	3	0.1011110	101
x_6	0.10	0.89	3.34	4	0.1110001	1110
x_7	0.01	0.99	6.66	7	0.1111110	1111110

此信源的熵为

$$H(X) = -\sum_{i=1}^7 P(x_i) \log_2 P(x_i) = 2.16 (\text{bit/符号})$$

码的平均长度

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^7 P(x_i) l_i = 3.14$$

编码效率

$$\eta = \frac{H(X)}{\bar{L}} = \frac{2.16}{3.14} = 83.1\%$$

由题可以看出, 香农编码所得的码字没有完全相同的, 所以香农码是非奇异码。但是, 由于香农码的编码效率不高, 而且冗余度比较大, 所以它不是最佳码, 实用性也受到较大限制。

2.1.6 其他编码

香农码与霍夫曼码主要针对无记忆信源进行编码，当信源有记忆时，上述编码的效率就不够理想，这时就应该考虑到游程编码。游程编码是霍夫曼码的改进和应用，它是利用先后符号之间的关联性进行编码，编码效率比较高，主要用于只有黑、白二值灰度的文件传真。符号序列中各个符号连续重复出现而形成符号串的长度就叫游程，又称游程长度或游长。设二元独立序列中符号 0 和 1 出现的概率分别为 p_0 和 p_1 ，则“0”游程长度 $L(0)$ 的概率为

$$p[L(0)] = p_0^{L(0)-1} p_1, L(0) = 1, 2, 3, \dots$$

同理可得“1”游程长度 $L(1)$ 的概率为

$$p[L(1)] = p_0 p_1^{L(1)-1}, L(1) = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{且有 } \sum_{L(0)=1}^{\infty} p[L(0)] = 1, \sum_{L(1)=1}^{\infty} p[L(1)] = 1。$$

“0”游程长度序列的熵为

$$H[L(0)] = \frac{H(p_0)}{p_1}$$

“1”游程长度序列的熵为

$$H[L(1)] = \frac{H(p_1)}{p_0}$$

“0”游程的平均长度 $\overline{l_0} = 1/p_1$ ，“1”游程的平均长度 $\overline{l_1} = 1/p_0$ ，假设“0”游程长度和“1”游程长度的霍夫曼编码效率分别为 η_0 、 η_1 ，则二元序列的游程编码效率为

$$\eta = \frac{\frac{H[L(0)]}{\eta_0} + \frac{H[L(1)]}{\eta_1}}{\frac{H[L(0)]}{\eta_0} + \frac{H[L(1)]}{\eta_1}}$$

香农码和霍夫曼码等编码方法都是建立在信源符号与码字一一对应的基础上的，这种编码方法通常称为块码或分组码。算术编码不在分组编码的范畴，它是一种非分组码的编码方式，它是一种从整个符号序列出发，采用递推形式进行编码的方法，信源信号和码字间不再是一一对应的关系。除此之外还要预测编码、变换编码等。