

物联网通信技术

吕慧 徐武平 牛晓光 编著

黄传河 审校



“十二五”国家重点图书出版规划

物联网工程专业规划教材

物联网通信技术

吕慧 徐武平 牛晓光 编著
黄传河 审校



图书在版编目 (CIP) 数据

物联网通信技术 / 吕慧, 徐武平, 牛晓光编著. —北京: 机械工业出版社, 2016.3
(物联网工程专业规划教材)

ISBN 978-7-111-52805-0

I. 物… II. ①吕… ②徐… ③牛… III. ①互连网络-应用-高等学校-教材 ②智能技术-应用-高等学校-教材 IV. ①TP393.4 ②TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 020364 号

本书以物联网通信技术为主线, 讲解物联网的概念、物联网中的无线通信技术和网络技术。全书共 9 章, 主要内容包括: 通信的基础知识; 无线通信的基本技术; 蓝牙、ZigBee、超宽频、射频识别技术和 NFC 等近距离无线通信技术; 无线局域网和无线城域网中远距离无线通信技术; 移动通信网络的结构和 GSM、CDMA、3G 以及 4G 技术; 电信网的结构、语音编码技术、复用结构以及多网融合技术; 自组织网络的概念、体系结构、关键技术、链路自适应技术和抗衰老、抗干扰技术; 无线传感器网络的概念、体系结构和关键技术, 以及异构网络的协同通信技术。

本书内容翔实, 结构清晰, 既可作为高等学校物联网工程专业以及信息、通信、电子、计算机、工程管理等专业本科生的教材, 也可作为从事物联网研究的专业技术人员、管理人员的参考书。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号, 邮政编码: 100037)

责任编辑: 曲 熠

责任校对: 董纪丽

印 刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版 次: 2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 22

书 号: ISBN 978-7-111-52805-0

定 价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

前 言



随着信息技术的快速发展和各种感知技术的广泛应用，互联网上部署的传感器类型和种类越来越多，这些传感器通过各种有线或无线网与互联网相连，并使用多种异构网络协议与互联网进行融合与通信，不仅仅是计算机之间，人与人、人与物、物与物之间更加广泛的互联逐步成为现实。1998年，在美国统一代码委员会（uniform code council, UCC）的支持下，美国麻省理工学院的研究人员创造性地提出将互联网与射频标识（RFID）技术有机结合，通过为物品贴上电子标识牌，实现物品与互联网的连接，即可在任何时间、任何地点实现对任何物品的识别与管理。这就是早期“物联网”的概念。

物联网是现代信息技术发展到一定阶段后出现的一种聚合性应用与技术提升，是对各种感知技术、现代网络技术和人工智能与自动化技术的聚合与集成。物联网就是用新一代的信息通信技术（ICT）将分布在不同地点的物体互联起来，使得物体之间能够像人与人之间一样相互通信，以增强物体智能化。物联网改变了人们之前将物理基础设施和IT基础设施截然分开的传统思维，将具有自我标识、感知和智能的物理实体基于通信技术有效连接在一起，使得政府管理、生产制造、社会管理以及个人生活实现互联互通。物联网被称为继计算机、互联网之后世界信息产业的第三次浪潮，将催生很多具有“计算、通信、控制、协同与自治特征的智能设备与系统”，促进各类信息技术的集成和创新。

物联网的发展得益于通信的发展，尤其是无线通信的发展。物联网通信技术让具有智能的物体在局域或者广域范围内实现信息可靠传递，让分处不同地域的物体能够协同工作。本书围绕物联网通信技术展开，主要讲授物联网的概念、物联网中的无线通信技术和网络技术。全书分为9章，主要内容如下：第1章介绍通信的基础知识；第2章介绍无线通信的基本技术；第3章介绍蓝牙、ZigBee、超宽频、射频识别技术和NFC等近距离无线通信技术；第4章介绍无线局域网和无线城域网中远距离无线通信技术；第5章介绍移动通信网络的结构和GSM、CDMA、3G以及4G技术；第6章介绍电信网的结构、语音编码技术、复用结构以及多网融合技术；第7章介绍自组织网络的概念、体系结构、关键技术、链路自适应技术和抗衰老、抗干扰技术；第8章介绍无线传感器网络的概念、体系结构和关键技术；第9章介绍异构网络的协同通信技术。本书内容翔实，结构清晰，既可作为高等学校物联网工程专业以及信息、通信、电子、

IV

计算机、工程管理等专业本科生的教材，也可作为从事物联网研究的专业技术人员、管理人员的参考书。

本书在黄传河教授的指导下编写完成，第1章由牛晓光和吕慧编写，第2~5章由徐武平编写，第6~8章由吕慧编写，第9章由牛晓光编写。本书的编写也得到了武汉大学计算机学院的大力支持，在此表示感谢。

由于时间仓促，在撰写过程中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者

教学建议



章号	教学要求	课时
第1章 物联网通信技术	本章主要介绍物联网通信涉及的基本概念、主要特点等基础知识,要求了解数据通信系统模型,掌握信源编码、信道编码、多路复用和调制等网络通信的基本概念和知识	6
第2章 无线通信技术	本章主要介绍无线通信的基本概念及现代无线通信的基本技术。基本概念包括定义、起源、特点、技术难点、无线信道及典型应用;现代无线通信基本技术主要介绍了扩频(序列扩频和跳频)通信和多址技术。教学重点应该放在无线信道、扩频通信机多址技术的介绍上,通过本章的教学,学生应该掌握无线通信的定义、起源、特点、难点及各种无线通信信道等基本知识,了解无线通信的典型应用;准确掌握扩频通信的两种典型方式——直接序列扩频和跳频通信的工作原理;在此基础上进一步掌握多址技术的用途和基本种类	4
第3章 近距离无线通信技术	短距离无线通信技术主要关注物联网感知层信息采集的无线传输,每种近距离无线通信技术都有其应用场景、应用对象。本章要求准确掌握蓝牙、ZigBee、超宽频三种近距离无线通信技术的概念、组网方式、主要特点、关键技术及协议,了解各种近距离无线通信的主要应用场景及对象	6
第4章 中远距离无线通信技术	准确掌握无线局域网的技术要点、组网方式、拓扑结构、协议体系,重点介绍 IEEE 802.11 标准中的 MAC 层工作原理,了解无线城域网(WMAN)的基本概念及相关标准,尤其是 WiMax 的相关概念及标准	4
第5章 移动通信技术	了解移动通信的基本概念及发展历史,掌握移动通信的系统结构、覆盖方式;重点掌握 GSM、GPRS、CDMA 及 3G 技术的概念、相互关系、主要技术特点、关键技术及相关标准,了解各种移动通信的相关协议、空中接口及管理规范等内容;了解 LET 及 4G 移动通信的基本概念、相关标准;掌握数字微波通信原理及卫星通信系统的构成,了解卫星移动通信的概念及类别	10
第6章 电信网络	了解通信网的基本概念和电话网的等级结构,重点掌握语音编码技术、电话网的 PDH 系列帧结构和 SDH 系列帧结构,以及目前的研究热点——多网融合技术	6

(续)

章号	教学要求	课时
第7章 自组织网络	了解自组织网络的概念,理解自组织网络的体系结构,掌握自组织网络的关键技术、链路自适应技术、抗衰落和抗干扰技术以及MAC层协议,了解网络层协议	8
第8章 无线传感器网络	由于后继有专业课程“无线传感器网络原理与技术”,因此该章内容简单介绍就可以,要求了解无线传感器网络的结构、协议和关键技术	2
第9章 异构网络协同通信技术	了解物联网异构网络系统的网络模型、资源管理技术和协同数据传输技术	2

目 录



前 言 教学建议

第1章 物联网通信技术 / 1

- 1.1 数据通信系统 / 1
- 1.2 信源编码 / 3
- 1.3 信道编码 / 5
- 1.4 多路复用 / 9
- 1.5 调制技术 / 12
 - 1.5.1 振幅键控 / 14
 - 1.5.2 移频键控 / 15
 - 1.5.3 移相键控 / 16
 - 1.5.4 正交幅度调制 / 18
 - 1.5.5 OFDM 调制 / 18
- 小结 / 21
- 习题 / 21
- 参考文献 / 21

第2章 无线通信技术 / 22

- 2.1 无线通信基础知识 / 22
 - 2.1.1 无线通信的定义及起源 / 22
 - 2.1.2 无线通信的特点 / 22
 - 2.1.3 无线通信技术举例 / 23
- 2.2 无线信道 / 24
 - 2.2.1 恒参无线信道举例 / 25
 - 2.2.2 恒参信道特性及其对信号传输的影响 / 26

- 2.2.3 随参无线信道举例 / 27
- 2.2.4 随参信道特性及其对信号传输的影响 / 29
- 2.2.5 随参信道特性的改善——分集接收 / 31
- 2.2.6 现代常用无线信道 / 32
- 2.3 无线通信原理概述 / 35
 - 2.3.1 天线 / 36
 - 2.3.2 信号传播 / 42
 - 2.3.3 窄带、宽带及扩展频谱信号 / 46
 - 2.3.4 固定和移动 / 47
- 小结 / 47
- 习题 / 47
- 参考文献 / 48

第3章 近距离无线通信技术 / 49

- 3.1 蓝牙技术 / 49
 - 3.1.1 蓝牙网络拓扑结构 / 50
 - 3.1.2 蓝牙协议体系结构 / 50
 - 3.1.3 蓝牙关键技术 / 53
- 3.2 ZigBee 技术 / 57
 - 3.2.1 ZigBee 技术特点 / 58
 - 3.2.2 ZigBee 网络的组成 / 59

- 3.2.3 ZigBee 网络的协议栈框架结构 / 61
- 3.2.4 ZigBee 网络的路由协议 / 66
- 3.3 超宽带技术 / 68
 - 3.3.1 UWB 的定义 / 68
 - 3.3.2 UWB 的实现方式 / 69
 - 3.3.3 UWB 的技术特点 / 70
- 3.4 射频识别技术 / 71
 - 3.4.1 RFID 系统构成 / 72
 - 3.4.2 RFID 通信的物理学原理 / 73
 - 3.4.3 RFID 信号的调制与解调 / 75
 - 3.4.4 RFID 系统的编码与解码 / 77
 - 3.4.5 RFID 的优势 / 82
- 3.5 WPAN 通信 / 82
- 3.6 NFC 近距离无线通信技术 / 83
 - 3.6.1 工作模式 / 83
 - 3.6.2 技术特征 / 84
 - 3.6.3 技术原理 / 84
- 小结 / 86
- 习题 / 86
- 参考文献 / 86

第4章 中远距离无线通信技术 / 87

- 4.1 无线局域网 / 87
 - 4.1.1 概述 / 87
 - 4.1.2 无线局域网的技术要点 / 88
 - 4.1.3 无线局域网的组成 / 88
 - 4.1.4 无线局域网的拓扑结构 / 89
 - 4.1.5 无线局域网的体系结构 / 90
 - 4.1.6 IEEE 802.11 标准中的物理层 / 92
 - 4.1.7 IEEE 802.11 标准中的 MAC 子层 / 94
- 4.2 无线信道特性 / 98
 - 4.2.1 无线信道传播特性 / 98
 - 4.2.2 无线局域网的信道 / 102
- 4.3 无线局域网的调制理论 / 103
 - 4.3.1 调制方式的选择 / 103
 - 4.3.2 无线局域网中的调制解调方式 / 104

- 4.4 无线局域网的扩频传输技术 / 108
 - 4.4.1 直接序列扩频 (DSSS) / 109
 - 4.4.2 跳频扩频 (FHSS) / 112
 - 4.4.3 直接序列扩频和跳频扩频的性能比较 / 114
 - 4.4.4 混合扩频系统 / 115
- 4.5 无线城域网 / 116
 - 4.5.1 无线城域网的发展历程 / 116
 - 4.5.2 IEEE 802.16 系列标准 / 117
 - 4.5.3 基于 IEEE 802.16 系列标准的 WiMax 技术 / 118
 - 4.5.4 WiMax 与 WiFi 的区别 / 120
- 小结 / 121
- 习题 / 122
- 参考文献 / 122

第5章 移动通信技术 / 123

- 5.1 移动通信的基本概念及发展历史 / 123
 - 5.1.1 移动通信的基本概念 / 123
 - 5.1.2 移动通信的发展历史 / 124
 - 5.1.3 移动通信的发展趋势与展望 / 127
- 5.2 无线传播与移动信道 / 128
 - 5.2.1 移动信道的特点 / 129
 - 5.2.2 3 类主要衰落 / 130
 - 5.2.3 移动通信中的几种主要噪声与干扰 / 133
- 5.3 多址技术与扩频通信 / 133
 - 5.3.1 多址技术的基本概念 / 134
 - 5.3.2 移动通信中的典型多址接入方式 / 136
 - 5.3.3 码分多址 (CDMA) 中的地址码 / 139
- 5.4 信源编码与数据压缩 / 141
 - 5.4.1 语音压缩编码 / 141
 - 5.4.2 移动通信中的语音编码 / 145
 - 5.4.3 图像压缩编码 / 148
- 5.5 移动通信中的鉴权与加密 / 157
 - 5.5.1 移动环境中的安全威胁 / 157

- 5.5.2 GSM 系统的鉴权与加密 / 157
 - 5.5.3 IS-95 系统的鉴权与加密 / 160
 - 5.5.4 WCDMA 系统信息安全 / 163
 - 5.6 调制理论 / 166
 - 5.6.1 移动通信系统的物理模型 / 166
 - 5.6.2 调制/解调的基本功能与要求 / 168
 - 5.6.3 MSK/GMSK 调制 / 169
 - 5.6.4 其他调制方法简介 / 173
 - 5.6.5 用于 CDMA 的调制方式 / 176
 - 5.7 移动通信中的信道编码 / 182
 - 5.7.1 GSM 系统的信道编码 / 182
 - 5.7.2 IS-95 系统的信道编码 / 184
 - 5.7.3 CDMA2000 系统的信道编码 / 186
 - 5.7.4 WCDMA 系统的信道编码 / 189
 - 5.8 分集 / 190
 - 5.8.1 分集技术的基本原理 / 190
 - 5.8.2 RAKE 接收与多径分集 / 192
 - 5.9 OFDM 技术 / 194
 - 5.9.1 OFDM 的基本原理 / 194
 - 5.9.2 OFDM 的信道估计 / 199
 - 5.9.3 OFDM 的同步技术 / 200
 - 5.9.4 多载波码分多址技术 / 203
 - 5.10 移动网络的结构与组成 / 205
 - 5.10.1 移动网络概述 / 205
 - 5.10.2 从 GSM 网络到 GSM/GPRS 网络 / 207
 - 5.10.3 第三代 (3G) 移动通信与 3GPP 网络 / 216
 - 5.10.4 从 IS-95 到 CDMA2000 / 222
 - 5.10.5 TD-SCDMA 简介 / 228
 - 5.10.6 3G 的关键技术小结 / 231
 - 5.11 LTE 及 4G 移动通信 / 234
 - 5.11.1 LTE / 234
 - 5.11.2 4G 移动通信 / 235
 - 5.11.3 4G 核心技术 / 238
 - 5.11.4 4G 的标准 / 240
 - 5.12 5G 移动通信发展趋势及关键技术 / 243
 - 5.12.1 5G 简介 / 243
 - 5.12.2 5G 的关键技术 / 244
 - 5.13 数字微波与卫星通信 / 246
 - 5.13.1 数字微波通信系统 / 246
 - 5.13.2 卫星通信系统 / 248
 - 5.13.3 卫星移动通信的概念 / 249
 - 5.13.4 多址联接方式 / 250
 - 5.13.5 频段同步卫星通信业务简介 / 250
 - 小结 / 251
 - 习题 / 252
 - 参考文献 / 252
- ## 第 6 章 电信网络 / 253
- 6.1 通信网 / 253
 - 6.1.1 通信网的基本结构 / 253
 - 6.1.2 现代通信网的构成 / 254
 - 6.1.3 电话网等级结构 / 255
 - 6.2 语音数字编码技术 / 256
 - 6.2.1 采样定理 / 256
 - 6.2.2 脉冲编码 / 256
 - 6.2.3 差值脉冲编码 / 258
 - 6.2.4 子带编码 / 260
 - 6.3 电话网帧结构 / 261
 - 6.3.1 基群帧结构 / 261
 - 6.3.2 准同步数字复用 (PDH) 系列帧结构 / 262
 - 6.3.3 同步数字复用系列帧结构 / 265
 - 6.4 数字程控交换技术 / 267
 - 6.4.1 交换技术的发展 / 267
 - 6.4.2 数字程控交换原理 / 268
 - 6.5 多网融合 / 271
 - 6.5.1 分组交换技术 / 271
 - 6.5.2 三网融合 / 272
 - 6.5.3 IP 多媒体子系统 (IMS) / 273
 - 6.5.4 固定移动融合技术 / 274
 - 6.5.5 IP 业务 / 275
 - 小结 / 278

习题 / 279

参考文献 / 279

第7章 自组织网络 / 280

7.1 自组织网络概述 / 280

7.1.1 自组织网络的定义 / 280

7.1.2 自组织网络的特点 / 281

7.1.3 自组织网络的应用 / 282

7.2 自组织网络的体系结构 / 283

7.2.1 节点结构 / 283

7.2.2 自组织网络的网络拓扑 / 283

7.2.3 自组织网络协议栈 / 284

7.3 自组织网络的关键技术 / 290

7.3.1 路由协议 / 290

7.3.2 服务质量 / 291

7.3.3 功率控制 / 291

7.3.4 安全问题 / 292

7.3.5 互联问题 / 293

7.4 自组织网络中的链路自适应技术 / 293

7.4.1 自适应编码调制 / 293

7.4.2 自适应帧长控制与自适应重传机制 / 295

7.4.3 多天线技术 / 297

7.5 无线抗衰落和抗干扰技术 / 300

7.5.1 无线交织技术 / 301

7.5.2 信道均衡技术 / 303

7.5.3 多用户检测技术 / 308

7.6 自组织网络的 MAC 层 / 309

7.6.1 竞争协议 / 309

7.6.2 分配协议 / 313

7.6.3 混合协议 / 314

7.7 自组织网络的网络层 / 314

7.7.1 主动式路由协议 / 314

7.7.2 按需路由协议 / 315

小结 / 316

习题 / 317

参考文献 / 317

第8章 无线传感器网络 / 318

8.1 无线传感器网络结构 / 318

8.1.1 单跳网络结构 / 318

8.1.2 多跳网络结构 / 319

8.2 无线传感器网络 MAC 协议 / 320

8.2.1 竞争型 MAC 协议 / 321

8.2.2 非竞争型 MAC 协议 / 323

8.2.3 混合型 MAC 协议 / 324

8.3 无线传感器网络的技术 / 325

8.4 无线传感器网络的应用 / 326

小结 / 327

习题 / 328

参考文献 / 328

第9章 异构网络协同通信技术 / 329

9.1 异构网络模型 / 329

9.2 异构网络资源管理 / 331

9.2.1 接入控制 / 331

9.2.2 网络选择 / 331

9.2.3 垂直切换 / 333

9.2.4 协同频谱感知 / 334

9.2.5 负载均衡 / 334

9.3 协同通信技术 / 335

9.3.1 用户协同通信系统 / 336

9.3.2 中继协同通信系统 / 336

9.3.3 基站协同通信系统 / 336

9.4 异构网络中的协同数据传输 / 337

9.4.1 队列调度 / 337

9.4.2 自适应功率调整 / 338

9.4.3 接入子网网内协同通信 / 338

小结 / 341

习题 / 341

参考文献 / 341

第1章 物联网通信技术

本章主要介绍物联网通信涉及技术的基本概念、主要特点等基础知识，主要包括：数据通信系统模型、信源编码、信道编码、多路复用和调制等通信知识。

1.1 数据通信系统

通信的实质就是实现信息的有效传递，它不仅要将有用的信息进行无失真、高效率的传输，而且还要在传输的过程中减少或消除无用信息和有害信息。数据通信系统一般包括发送端、接收端以及收发两端之间的信道三个部分，如图 1-1 所示。

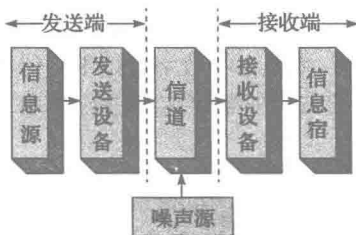


图 1-1 数据通信系统的模型

信息源是信息或信息序列的产生源，它泛指一切发信者，可以是人也可以是机器设备，能够产生诸如声音、数据、文字、图像、代码等电信号。信息源发出信息的形式可以是连续的，也可以是离散的。

发送设备把信息源发出的信息变换成便于传输的形式，使之适应于信道传输特性的要求并送入信道的各种设备。发送设备是一个整体概念，可能包括许多电路、器件与系统，比如把声音转换为电信号的麦克风，把基带信号转换成频带信号的调制器等。

信道是指传输信号的通道。根据传输介质的不同，可分为有线信道（明线、电缆、光纤等）和无线信道（微波、卫星等）。明线和电缆可用来传输速率低的数字信号，其他信道均要进行调制。只经信道编码而不经调制就可直接送到明线或电缆



中去传输的数字信号称为数字基带信号，经调制后的信号称为频带信号。信道中自然会有噪声，可能是进入信道的各种外部噪声，也可能是通信系统中各种电路、器件或设备自身产生的内部噪声。

接收设备接收从信道传输过来的信息，并转换成信息宿便于接收的形式，其功能与发送设备的功能刚好相反。接收设备也是一个整体概念，可能包括许多电路、器件与系统，比如把频带信号转换为基带信号的解调器，把数字信号转换为模拟信号的数/模转换器等。

信息宿是接收发送端信息的对象，它可以是人，也可以是机器设备。

按照信道中所传输信号的形式不同，通信系统可以进一步分为模拟通信系统和数字通信系统。数字通信系统的模型如图 1-2 所示，它完成信号的产生、变换、传递及接收。

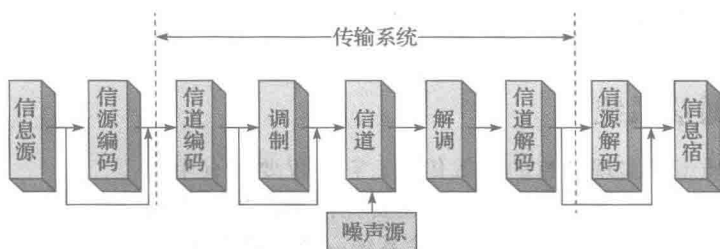


图 1-2 数字通信系统的模型

信源编码的主要功能是把人的语音以及机器产生的如文字、图表及图像等模拟信号变换成数字信号，即所谓的模/数（A/D）变换。在数字系统中，信源编码一般包括模拟信号的数字化和压缩编码两个范畴，压缩编码对数字信号进行处理，去除或减少信号的冗余度。

信道编码是将数字信号变换成与调制方式和传输信道匹配的形式，从而降低传输误码率，提高传输的可靠性。

根据信道介质特性，编码后的数字信号还要经调制后再送入信道中，如光纤信道中的光调制，无线信道中的调频、调相、调幅等。

解调、信道解码和信源解码分别是调制、信道编码和信源编码的逆过程。

在无线通信系统中，信源和信道是组成通信系统的最基本单元。信源是产生信息的源，无线信道则是传承载荷信息的信号所通过的通道，信源与信息宿之间的通信是通过无线信道来实现的。

度量无线通信的技术性能主要是从通信的数量与质量两方面来讨论的，一般数量指标用有效性度量，而质量指标用可靠性度量。前者主要与信源统计特性有关，而后者则主要决定于无线信道的统计特性。

无线通信的重点之一是无线信道，在考虑通信有效性的同时主要研究无线通信的质量，即可靠性问题。从无线通信系统的优化观点来看，无线通信研究的另一个重点应是信源，它主要研究无线通信的数量，即有效性问题。只有同时研究无线通信的数量与质量、有效性和可靠性，同时研究信源和无线信道，才能使整个无线通信系统实现优化，达到既有效又可靠。可见，无线通信系统是信源与无线信道相配合的统一体，无线通信系统的优化应是寻求信源与无线信道之间最佳的统计匹配。

1.2 信源编码

从信息论观点看, 实际的信源若不经过程序处理, 即信源编码, 信源会存在大量的统计多余成分, 这一部分信息完全没有必要通过信道传送给接收端, 因为它完全可以利用信源的统计特性在接收端恢复出来。信源编码的任务是在分析信源统计特性的基础上, 设法通过信源的压缩编码去掉这些统计多余成分。本节将扼要介绍信源编码定理, 举出几种常见的信源编码方法。

实际信源可抽象概括为两大类: 离散(或数字)信源和连续(或模拟)信源, 其中文字、电报以及各类数据属于离散信源, 而未经数字化的语音、图像则属于连续信源。信源输出的平均信息量可定义为信息熵, 它定义为单个消息产生的自信息量的概率统计平均值。

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

式中, n 为产生消息的可能种类数, $P(x_i)$ 为各种情况出现的概率。

根据对信源编码的要求是无失真地恢复出原信源的输出符号还是可允许一定程度的失真, 可将信源编码分为无失真信源编码和限失真信源编码。一般离散信源均为无失真信源编码, 而连续信源则采用限失真信源编码。信源编码定理给出: 对于给定的失真率 D , 总可以找到一种信源编码方式, 只要信源速率 R 大于 $D(R)$, 就可以在平均失真任意接近 D 的条件下实现波形重建。其中 $R(D)$ 称为信息率失真函数, 表达式见公式(1-2):

$$R(D) = \min_{P(y_j | x_i) \in P_D} I[P(x_i); P(y_j | x_i)] \tag{1-2}$$

式中, $P_D = \{P(y_j | x_i) : D \geq \bar{d} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(x_i) P(y_j | x_i) d_{ij}\}$ 表示试验信道条件转移概率 $P(y_j | x_i)$ 的变化范围的集合, 也可以看成对 $P(y_j | x_i)$ 取值范围的限制。 $P(y_j | x_i)$ 表示已知发送信息为 x_i 接收端得到信息 y_j 的概率。允许失真 D 为信源客观失真函数的上界, 其中 $\bar{d} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(x_i, y_j) d(x_i, y_j)$, $d(x_i, y_j)$ 为接收序列和发送序列间的汉明距离。由此可见, $R(D)$ 为单调非增函数, 速率越高, 平均失真越小。

下面介绍几种常见的无失真离散信源编码方法。

1. 等长编码

等长编码是将每个欲编码的字符都用定长的编码表示。

【例 1-1】 设有一个简单离散单消息信源如下, 其中 $n=4$, $L=1$, $n^L=4$; $K=2$, $m=2$, $m^K=4$ 。

$$\begin{pmatrix} X \\ P(x_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} \end{pmatrix}$$

等长编码 00 01 10 11

若对其进行无失真等长编码, 试求其信源熵 $H(X)$ 及编码效率 η 值。

解
$$H(X) = -\sum_{i=1}^4 P(x_i) \log P(x_i) = 1.75 \text{ 比特/符号}$$

等长编码 $K=2$

$$\text{编码效率 } \eta = \frac{H(X)}{K} = \frac{7/4}{2} = \frac{7}{8} = 87.5\%$$

例 1-1 的等长编码是无失真编码，但是编码效率极低。

2. 变长编码

为提高编码效率（即提高编码的有效性），需要将单消息信源进行扩展，构成消息序列，然后进行联合编码。但是要实现近似无失真信源编码，需要近似 100 万个信源符号进行联合编码才能达到，这显然是不现实的。可以得出结论：对于概率特性相差较大的信源采用等长编码是不大现实的，然而大部分实际信源的概率特性都相差比较大，因此，很自然地人们将注意力转向变长编码，采用变长编码来构造最优的信源编码。为此，从 20 世纪 40 年代开始，香农、赞诺和霍夫曼分别提出了各自的编码算法，其中 1952 年提出的霍夫曼编码是一类异前置（或非延长）的变长编码，其平均码长最短，称它为最佳变长编码。

变长编码的思路是根据信源符号出现概率的不同来选择码字，出现概率大的用短码，出现概率小的用长码，使平均编码长度最短，因而可提高编码效率。

【例 1-2】仍以例 1-1 中的信源进行逐位变长编码

$$\begin{array}{l} \left(\begin{array}{c} X \\ P(x_i) \end{array} \right) = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} \end{pmatrix} \\ \text{变长编码} \quad 0 \quad 10 \quad 110 \quad 111 \end{array}$$

试求其编码效率。

解 同样可求得

$$H(X) = - \sum_{i=1}^4 P(x_i) \log P(x_i) = \frac{7}{4} \text{ 比特/符号}$$

进行逐位编码 ($L=1$)，平均码长

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^4 P(x_i) K_i = \frac{1}{2} \times 1 + \frac{1}{4} \times 2 + 2 \times \frac{1}{8} \times 3 = \frac{7}{4}$$

这样，可求得编码效率 ($L=1, R=\bar{K}$)

$$\eta = \frac{H(X)}{K} = \frac{7/4}{7/4} = 1$$

可见，若采用变长编码，逐位编码 ($L=1$) 即可达到 100% 的效率。然而前面在等长编码中只有将近与 100 万个符号进行联合编码才能达到 95% 的效率，两者相差甚大。

3. 霍夫曼编码

霍夫曼编码是变长编码，也是一类重要的异前置码。其编码效率高，且能无失真地译码。

【例 1-3】设有一个离散单消息（符号）信源如下：

$$\left(\begin{array}{c} X \\ P(x_i) \end{array} \right) = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 \\ 0.20 & 0.19 & 0.18 & 0.17 & 0.15 & 0.10 & 0.01 \end{pmatrix}$$

试对它进行霍夫曼编码。

解 首先根据信源信息（符号）概率的大小排队并按照下列规则对其进行编码：

- 1) 将信源消息 X 按概率大小自上而下排序。
- 2) 从最小两个概率开始编码，并赋予一定规则，比如上支路为“0”，下支路为“1”，若两支路概率相等，规则不变，且该规则在整个编、译过程中不变。
- 3) 将已编码的两支路概率合并，并重新排序、编码。
- 4) 重复步骤3)，直至合并概率归一时为止。
- 5) 从概率归一端沿树图路线逆行至对应消息和概率，并将沿线已编的“0”与“1”编为一组，即为该消息（符号）的编码。比如： x_1 编为“10”， x_2 编为“0111”。
- 6) 最终得到 $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]$ 的霍夫曼编码分别为 $[10, 11, 000, 001, 010, 0110, 0111]$ 。

霍夫曼编码现已广泛用于各类图像编码中，然而应用最早、最为有效的则是在传真编码中。在传真编码中应用的是游程编码，它是一类基于霍夫曼编码的推广，即将霍夫曼编码中对单个消息（符号）的统计匹配编码推广至信源中0序列与1序列的消息序列进行统计匹配，其基本思想完全是一致的。

霍夫曼编码被称为最优的变长信源编码，但是这一最佳性能是建立在稳定、确知的概率统计特性的基础上，一旦统计特性不稳定或发生变化或不完全确知，变长编码将失去统计匹配的前提，其性能必然引起恶化，实际信源往往不可能提供很稳定、确知的概率特性，因此人们开始研究比较稳健、适应性比较强的准最佳信源编码。算术编码就是其中最出色的一个。其理论性能虽然比霍夫曼码稍有逊色，但是其实际性能往往优于霍夫曼码，是近20年来发展迅速的一种实用化的无失真离散信源编码，这里就不再讨论。

对于限失真的连续信源编码，首先需要将连续信源转换为离散信源，该过程主要涉及模数转换、抽样和量化的处理，该部分内容在通信原理中有详细的介绍，这里也不再讨论。

1.3 信道编码

信道编码是为了保证通信系统的传输可靠性，克服信道中的噪声和干扰，而专门设计的一类抗干扰的技术和方法。它根据一定的（监督）规律在待发送的信息码元中（人为的）加入一些必要的（监督）码元，在接收端利用这些监督码元与信息码元之间的（监督）规律，发现和纠正差错，以提高信息码元传输的可靠性。待发送的码元称为信息码元，人为加入的多余码元称为监督（或校验）码元。信道编码的目的是试图以最少的监督码元为代价，换取最大程度的可靠性的提高。

信道编码种类繁多，大体包括分组码、卷积码、网格编码、Turbo 码等。

1. 分组码

将信源的信息序列按照独立的分组进行处理和编码，称为分组码。编码时将每 k 个信息位分为一组进行独立处理，变换成长度为 $n(n > k)$ 的二进制码组。简单实用的分组码包括线性分组码、循环码以及检错码。

(1) 线性分组码

线性分组码一般是按照代数规律构造的，故又称为代数编码。线性分组码中的分组

是指编码方法是按信息分组来进行的,而线性则是指编码规律,即监督位(校验位)与信息位之间的关系遵从线性规律。线性分组码一般可记为 (n, k) 码,即 k 位信息码元为一个分组,编成 n 位码元长度的码组,即 $n-k$ 位为监督码元长度。

在线性分组码中,最具有理论和实际价值的一个子类称为循环码,它因为具有循环移位性而得名,它产生简单且具有很多可利用的代数结构和特性。目前一些有应用价值的线性分组码均属于循环码。例如,在每个信息码元分组 k 中,仅能纠正一个独立差错的汉明(Hamming)码;可以纠正多个独立差错的 BCH 码;仅能纠正单个突发差错的 Fire 码;可以纠正多个独立或突发差错的 RS 码。

(2) 循环码

循环码是线性分组码中最重要的一个子类。它的最大特点是理论上有着成熟的代数结构,可采用多项式描述,能够用移位寄存器来实现。

1) 循环码的多项式表示。循环码具有循环推移不变性:若 C 为循环码,即 $C = (c_1, c_2, \dots, c_{n-1})$,若将 C 左移、右移若干位,其性质不变,且具有循环周期性。对任意一个周期为 n 的(即 n 维的)循环码,一定可以找到一个唯一的 n 次码的多项式表示,即在两者之间可以建立一一对应的关系。

n 元码组	n 阶码的多项式
$C = (c_1, c_2, \dots, c_{n-1})$	$c(x) = c_0 + c_1x + \dots + c_{n-1}x^{n-1}$
码组(字)之间的模 2 运算	码多项式间的乘积运算
有限域 $GF(2^k)$	码多项式域 $F_2(x) \bmod f(x)$

上述对应关系可以用下面例子说明。

$$C = (11010) \text{——} c(x) = 1 + x + x^3$$

$$\text{右移一位为 } 01101 \text{——} xc(x) = x + x^2 + x^4$$

两者模 2 加——两码多项式相乘

由上述两者之间一一对应的同构关系,可以将通常在通常的有限域 $GF(2^k)$ 中的“同余”(模)运算进一步推广至多项式域,并进行多项式域中的“同余”(模)运算,如下:

$$\frac{c(x)}{p(x)} = Q(x) + \frac{r(x)}{p(x)} \quad (1-3)$$

或写为

$$c(x) = r(x) \bmod p(x) \quad (1-4)$$

式中, $c(x)$ 为码多项式, $p(x)$ 为素(不可约)多项式, $Q(x)$ 为商, $r(x)$ 为余多项式。

2) 生成多项式和监督多项式。在循环码中,可将上面线性分组码的生成矩阵 G 与监督矩阵 H 进一步简化为对应生成多项式 $g(x)$ 和监督多项式 $h(x)$ 。

以 $(7, 3)$ 线性分组码为例,其生成矩阵可以表示为

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

将 G 进行初等变换后得