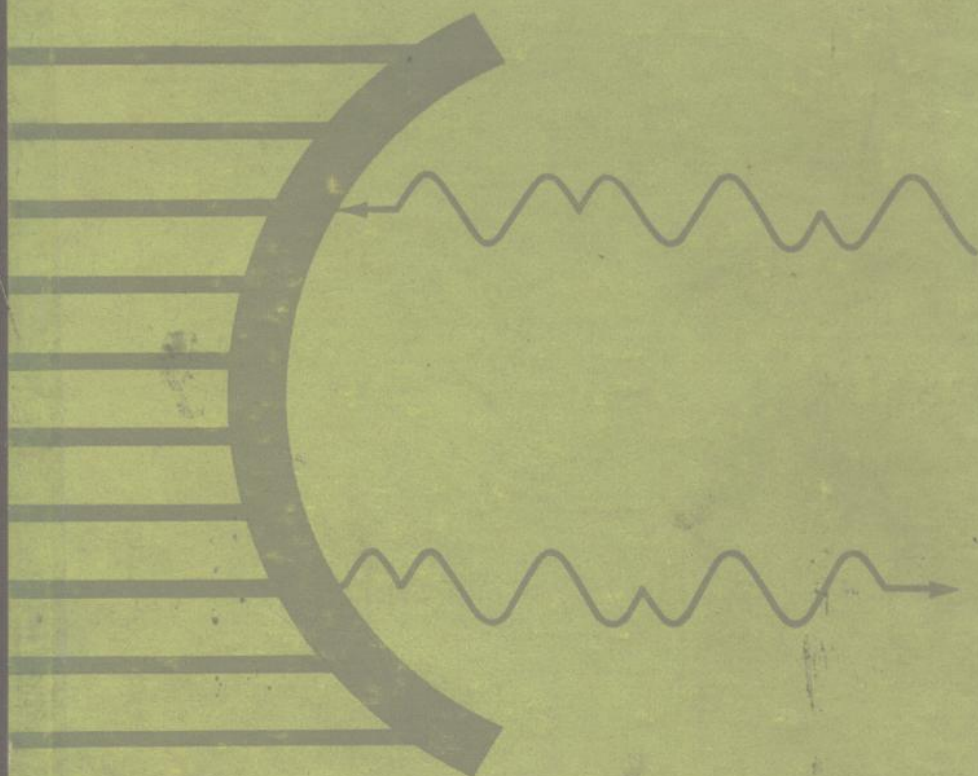


数字微波中继通信

姚彦 尚华庭 刘重隆 编著



人民邮电出版社

数字微波中继通信

姚彦 肖华庭 刘重隆 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书介绍数字微波中继通信的原理与设备,包括:数字微波通信系统的组成、全固态化微波收发信设备、数字相位调制、解调与同步技术、提高频谱利用率的高速传输技术以及辅助电路、整机测试、总体设计和设备举例等。既说明基本原理,又给出具体电路的实现方法,并对一些重要的关系式作了较为详细的推导和定量分析。

本书适合于从事微波通信工作的工程技术人员和大专院校通信专业的高年级学生阅读。

数 字 微 波 中 继 通 信

姚 彦 肖华庭 刘重隆 编著

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北 京 东 长 安 街 27 号

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本: $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 1981年6月第一版
印张: $18 \frac{8}{32}$ 页数: 292 1981年6月北京第一次印刷
字数: 479 千字 印数: (精) 1—2,100 册
(平) 1—3,100 册

统一书号: 15045·总2455-无6126

定价: (精) 3.00 元
(平) 2.25 元

前 言

微波中继通信具有容量大、传输效率高、安装方便及成本低等优点，是当前世界各国采用的一种主要通信方式。我国第一条微波中继通信线路是六十年代初开始建立的，目前已试制成功 2,4,6,8 GHz 各个频段和 60, 120, 300, 600, 960, 1800 路各种容量的设备。

随着数字技术的迅速发展，微波通信又有了新的变革，数字微波中继通信技术日趋完善。与模拟微波通信相比较，这种通信方式占用的频带较宽，传输容量受到一定的限制，但它却具有许多独特的优点：第一，数字信号可以在中继站再生，从而避免了长距离传输时噪声的积累；第二，便于各种数字业务（如：图象、语言、数据和电报等）的交换和传输；第三，容易实现保密通信。目前国际上已有一些数字微波中继通信系统投入使用，并正在向高频段（几十千兆赫）、高比特率（几百兆比特~一千兆比特）和提高频谱利用率（2~3 比特/秒·赫）方向发展。我国的数字微波通信，现在也在不断扩展其实用范围。

为了配合我国数字通信的发展，我们结合自己的工作，编写出这本书，供有关工程技术人员参考。在编写时，考虑到有些读者对数字通信的原理和特点比较陌生，因此开始先用了整两章的篇幅（第一、二章）介绍数字信号传输的基本原理和数字微波中继通信的一般组成，作为阅读以后各章的预备知识。第一章中有关功率密度谱和误码率的定量计算，在写法上使初学者可以理解，但这部分内

容对专门从事数字通信设备研制的读者，也有一定的参考价值。

其余各章的内容安排如下：

第三章到第七章分别讨论数字微波中继系统的发信、收信、调制、解调和同步等问题。考虑到全固态化是微波技术的发展方向，所以三、四两章对发信、收信设备的讨论，以微波固态电路为重点。由于目前绝大多数数字微波通信都采用相位键控技术，因此第五章和第六章讲调制、解调时，只讨论了数字相位调制与数字相位解调。数字传输系统的同步主要是载波同步与码位同步；而载波同步与信号解调有着密切的关系，因此我们把载波同步问题安排在第六章与相位解调同时讲述。第七章集中讨论有关位同步恢复的问题。

提高微波频谱利用率是目前数字微波通信的一个重要研究课题，国外采用一些新的调制技术（如：8 PSK, QPSK, 16 QAM 等）已达到较高的频谱利用率。国内也正在开展这方面的研究工作。因此，本书第八章专门介绍这方面的进展和主要内容，供感兴趣的读者参考。

第九章到第十二章主要讨论辅助电路、性能测试以及总体设计和整机组成等内容。其中第九章介绍数字微波中继设备常用的辅助电路，如：勤务电路、误码监视电路、告警切换电路及扰码电路等。第十章介绍数字微波整机性能测试的一些方法，以误码测试及位同步测试方法为重点。第十一章讨论数字微波中继系统的总体设计问题。第十二章以国内几种小容量数字微波中继通信设备为例，介绍整机组成的情况。

本书是集体劳动的成果。本书的许多内容取材于四机部通信工程公司、1919 研究所、北京广播器材厂、重庆无线电厂、北京微波通信设备厂、苏州江南无线电厂及哈尔滨工业大学等单位的有关科研资料及短训班教材。我系吴佑寿教授对本书的编写工作给以多方面的指导，并仔细审阅过全部书稿。通信教研室传输组的同志们参加

了全书草图的绘制工作。对这些单位和同志们，我们表示衷心的感谢。由于我们的理论水平不高，实践经验有限，书中难免有不少错误和缺点，请广大读者多加批评指正。

作者

于清华大学无线电电子学系

一九七九年十月

目 录

第一章 数字信号传输基本原理	1
1.1 引言	1
1.2 数字信号的表示方法	3
1.2.1 一般形式	3
1.2.2 数字信号的电脉冲表示法	4
1.2.3 多进制	8
1.3 数字信号的基带传输	11
1.3.1 传输过程概述	11
1.3.2 传输畸变的表示方法	14
1.3.3 奈奎斯特准则	16
1.3.4 时域均衡技术	20
1.3.5 部分响应技术	24
1.4 数字信号的频带传输	27
1.4.1 数字信号的调制	28
1.4.2 数字信号的解调	36
1.4.3 数字信号的最佳检测	39
1.5 数字信号的功率密度谱	44
1.5.1 消息源的统计特性	44
1.5.2 基带信号功率密度谱的计算	46
✓ 1.5.3 载波键控信号的功率密度谱	55
1.5.4 载波正交调幅信号的功率密度谱	65
1.6 数字信号传输的误码率	69
参考文献	77
第二章 有关数字微波通信系统组成的若干问题	78
2.1 数字微波中继通信网的组成	78

2.2 模-数兼容	80
2.3 视距传播	85
2.3.1 自由空间传播	85
2.3.2 自由空间传播的大气效应	88
2.3.3 自由空间传播的地面效应	91
2.3.4 衰落与分集接收	95
2.3.5 极化与交叉极化鉴别率	100
2.3.6 传播失真	101
2.4 中继方式	105
参考文献	108
第三章 数字微波发信设备	109
3.1 数字微波发信设备的组成与主要技术指标	109
3.1.1 数字微波发信设备的技术指标	109
3.1.2 数字调制的实现方法	111
3.1.3 微波振荡源	115
3.2 晶体管微波功率放大器与振荡器	116
3.2.1 微波功率晶体管的主要参数和阻抗测量	116
3.2.2 窄带微波功率放大器	121
3.2.3 宽带微波功率放大器	124
3.2.4 晶体管微波功率振荡器	127
3.3 微波二极管振荡器与放大器	133
3.3.1 微波二极管振荡器的工作原理	133
3.3.2 微波振荡器的功率合成	138
3.3.3 微波二极管功率放大器	140
3.4 微波倍频器与上变频器	143
3.4.1 微波倍频器	143
3.4.2 微波功率上变频器	149
3.5 微波振荡源的频率稳定	152
3.5.1 高Q腔稳频法	152
3.5.2 注入锁相稳频法	155
3.5.3 闭环锁相稳频法	162

参考文献	167
第四章 数字微波收信设备	169
4.1 数字微波收信设备的组成与主要技术指标	169
4.2 微波晶体管低噪声放大器	174
4.2.1 微波低噪声晶体管的特性	174
4.2.2 微波晶体管的 S 参量	175
4.2.3 微波晶体管低噪声放大器的电路举例	176
4.3 微波本振源与自动频率微调系统	177
4.3.1 微波本振源的电路组成	177
4.3.2 本振源的自动频率微调	178
4.4 微波二极管混频器	182
4.4.1 微波混频二极管	182
4.4.2 变频损耗	183
4.4.3 混频噪声	184
4.4.4 平衡混频器工作原理	185
4.4.5 几种实用的平衡混频器	187
4.5 前置中频放大器	191
4.6 中频滤波器	193
4.7 主中放	197
4.7.1 共基极宽频带放大器	198
4.7.2 负反馈对管宽频带放大器	204
4.7.3 差分对管宽频带放大器	208
4.8 自动增益控制系统	211
4.8.1 可变衰减器	212
4.8.2 自动增益控制电路	214
参考文献	216
第五章 数字相位调制	217
5.1 数字调相原理	217
5.1.1 数字调相信号的功率密度谱	217
5.1.2 数字调相信号的正交展开	219

5.1.3	相对移相与差分编码	221
5.1.4	数字调相器的性能指标	222
5.2	中频二相调相器	223
5.3	反射型微波二相调相器	227
5.3.1	性能分析	227
5.3.2	电路组成	235
5.3.3	调试方法	241
5.3.4	采用 3 分贝耦合器的反射型 $0-\pi$ 调相器	245
5.4	四相调相器	247
5.4.1	四相调相器的组成原理	247
5.4.2	中频四相调相器	249
5.4.3	微波反射型四相调相器	251
5.4.4	相位逻辑与差分编码	253
	参考文献	257
	附录 1 关于相对载漏关系式的推导	257
第六章	数字相位解调	260
6.1	数字调相信号的相干检测及误码性能	260
6.1.1	相干检测系统信噪比的三种定义	260
6.1.2	几种典型情况的信噪比	264
6.1.3	码间串扰对误码率的影响	272
6.1.4	相干检测系统的最佳化	275
6.2	检测器的电路	276
6.2.1	相乘器	277
6.2.2	积分器	280
6.2.3	判决器与取样器	284
6.3	二相信号的同步解调	288
6.3.1	载波相位误差及其对误码率的影响	288
6.3.2	对残留载波的跟踪	291
6.3.3	对抑制载波的跟踪	297
6.3.4	相位抖动的计算	305
6.4	二相信号的延迟解调	310

6.4.1 延迟解调的解码逻辑与相位误差的影响	310
6.4.2 延迟线	313
6.4.3 可变移相器	314
6.4.4 利用延迟线同时完成延迟和移相作用	317
6.5 四相信号的解调	320
6.5.1 四相 PSK 系统的误码性能	320
6.5.2 四相信号的同步解调	322
6.5.3 四相信号的延迟解调	330
参考文献	332
附录 1 关于平方环相位抖动的计算	333
第七章 位同步恢复	342
7.1 位同步的重要性	342
7.2 传送位同步信号的几种方法	344
7.3 从数字信号中提取位同步的原理	348
7.4 位同步信号的产生	352
7.4.1 从基带信号中产生位同步	352
7.4.2 从中频调相信号中产生位同步	356
7.4.3 各种位同步产生方法的信噪比	360
7.5 位同步信号的提纯	367
7.5.1 滤波法	368
7.5.2 锁相法	372
7.6 信道透明度与位同步的中断保护	376
参考文献	379
第八章 提高频谱利用率的高速传输技术	380
8.1 引言	380
8.2 八相相位键控技术(8 PSK)	383
8.2.1 八相相位键控技术的调制解调器	383
8.2.2 八相相位键控信号的功率密度谱及误码率特性	394
8.2.3 八相相位键控信号通过传输信道	397
8.3 正交部分响应技术(QPRS)	400

8.3.1	正交部分响应的调制方法	401
8.3.2	正交部分响应信号的解调	404
8.3.3	正交部分响应系统的差分编码	405
8.3.4	正交部分响应系统的载波和位同步恢复电路	406
8.3.5	正交部分响应系统的性能	407
8.4	十六进制正交调幅技术(16 QAM)	410
8.4.1	调制器	410
8.4.2	解调器	411
8.4.3	十六进制正交调幅系统的预编码	413
8.4.4	十六进制正交调幅系统的性能	415
8.5	结束语	416
	参考文献	419
第九章	辅助电路	420
9.1	勤务电路	420
9.1.1	勤务电路的几种组成方式	420
9.1.2	采用附加调频的勤务电路	421
9.1.3	主信道与勤务信道的相互干扰	430
9.2	误码监视电路	434
9.2.1	误码监视的必要性	434
9.2.2	误码监视的几种方法	436
9.2.3	伪误码监视的分析计算	440
9.2.4	伪误码监视的电路实现	445
9.3	告警与信号指示电路	449
9.3.1	告警电路	449
9.3.2	信号指示电路	452
9.4	备份与自动切换电路	453
9.4.1	工作原理	453
9.4.2	切换逻辑	455
9.4.3	切换执行电路	457
9.4.4	业务通道的备份与切换	458
9.5	扰码电路	459

9.6 数字接口电路	463
参考文献	464
第十章 整机性能测试	465
10.1 发信机性能测试	465
10.1.1 输出功率	465
10.1.2 输出频率及其稳准度	466
10.1.3 杂散辐射	466
10.1.4 调制误差	467
10.1.5 机馈端驻波比	467
10.2 收信机性能测试	467
10.2.1 噪声系数	467
10.2.2 本振频率及其稳准度	471
10.2.3 本振辐射	471
10.2.4 自动增益控制性能	471
10.2.5 通带幅频特性及选择性	472
10.2.6 机馈端驻波比	472
10.3 误码性能测试	472
10.3.1 码组发生器	473
10.3.2 误码仪	479
10.3.3 室内误码测试	482
10.3.4 现场误码测试	483
10.4 位同步性能测试	485
10.4.1 利用误码仪测试位同步性能	485
10.4.2 位同步抖动性能的测试	487
10.5 其它性能测试	494
10.5.1 基带接口测试	494
10.5.2 业务信道测试	495
10.5.3 自动切换性能测试	495
10.5.4 电源测试	496
参考文献	496
第十一章 数字微波中继系统的总体设计	497

11.1	引言	497
11.2	假想参考电路与传输质量标准	498
11.2.1	假想参考电路	499
11.2.2	误码率	501
11.2.3	基带接口	502
11.3	调制方式	504
11.4	射频波道的频率配置	507
11.4.1	基本概念	508
11.4.2	模拟微波中继系统的波道频率配置	509
11.4.3	数字微波中继系统的波道频率配置	511
11.5	中频频率选择	512
11.6	可靠性估算	513
11.6.1	可靠性基本知识	513
11.6.2	数字微波中继系统可靠性估算	517
11.7	设备能力估算	520
11.7.1	归一化信噪比的理论门限	521
11.7.2	恶化储备量与实际门限信噪比	523
11.7.3	视距传播方程与电平富余量	526
11.7.4	传播中断率与衰落储备量	528
11.8	干扰及防护估算	529
11.8.1	干扰的性质与分类	530
11.8.2	总干扰量及其分配	534
11.8.3	干扰防护度的计算	535
	参考文献	536
第十二章	数字微波中继通信设备举例	537
12.1	2 GHz 32/120 路 PGM 数字微波接力机	537
12.1.1	引言	537
12.1.2	主要技术指标	538
12.1.3	接力机设备组成及工作原理	540
12.2	6 GHz 120 路 PGM 数字微波接力机	549

12.2.1	引言	549
12.2.2	主要技术指标	549
12.2.3	接力机的设备组成原理	551
12.2.4	设备结构情况	560
12.2.5	天馈系统	561
12.3	11 GHz 16/32 路 ΔM 数字微波接力机	562
12.3.1	引言	562
12.3.2	主要技术指标	562
12.3.3	整机工作原理	564

第一章 数字信号传输基本原理

本章为初次接触数字通信的读者扼要地介绍数字信号传输的一些基本知识。前三节(数字信号的表示方法、基带传输、频带传输等)主要是定性描述,使读者对数字通信有一些初步概念;后两节,即数字信号的功率密度谱及误码率,则偏重于定量计算,在分析一个数字通信系统时,将用到这种计算。

1.1 引言

通信系统可以分为模拟通信和数字通信两大类。一般的电话、电视等属于模拟通信,电报、数据传输、脉码调制与增量调制电话等则属于数字通信。

模拟信号和数字信号可以互相变换。例如话筒(微音器)输出的话音信号是模拟信号。将它进行取样、量化、编码之后,可变换成数字信号;而经过相反的变换过程也可把数字化的话音信号,恢复成为相应的模拟话音信号。这种变换和反变换分别叫做模—数变换和数—模变换,也叫做编码和解码。

图 1-1 表示把模拟信号变换成数字信号的过程。对模拟信号 $s(t)$ 按一定的周期 T_s 进行取样,然后量化、编码,形成如图 1-1(b)所示的数字信号。最常用的编码是二进制编码,每个码元只有两种可能的状态,通常用数字 1,0 来表示。一个码元所占的时间 T_s 叫做码长。单位时间内传输的码元数,叫做数码率 f_s ,它和 T_s 的关系是: $f_s = \frac{1}{T_s}$ 。一个二进制码元叫做比特,因此,二进制码元的数码率的单位是比特/秒,记为 b/s 。这种模—数变换叫做脉冲编码

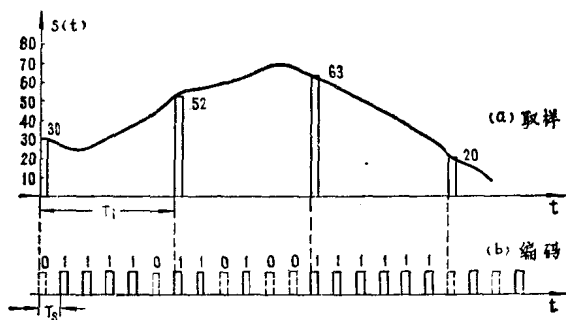


图 1-1 取样与编码

调制，记为 PGM。

关于话音信号编码方法，国际上已有规定。一种方法是：话音信号的取样频率为 8 千赫（取样周期 T_i 等于 125 微秒），每个取样值按一定规律编为 8 个二进制码。这样，一路编码话音信号的数码率等于 $8 \times 8000 = 64,000$ 比特/秒。

关于把多路编码数字电话组成各种群路的方法，国际电报与电话咨询委员会 (CCITT) 曾规定了两种标准。一种是西欧各国主要采用的 30 路系列，即由 32 个话路（实际使用 30 个话路，另有二个话路作为其它用途）组合成为一个基本群，叫做基群；四个基群构成一个二次群；四个二次群构成一个三次群，等等。另一种是日本和北美各国主要采用的 24 路系列，即由 24 个话路组成一个基群；四个基群构成一个二次群；五个或七个二次群构成一个三次群，等等。这两种系列的各级群路容量、数码率及相互关系见表 1-1。注意，表中不同群次的数码率不成整数倍关系。例如 30 路系列的基群数码率是 2.048 Mb/s，二次群数码率不是 $4 \times 2.048 \text{ Mb/s} = 8.192 \text{ Mb/s}$ ，而是取 $4 \times 2.048 \text{ Mb/s} + 0.256 \text{ Mb/s} = 8.448 \text{ Mb/s}$ ，这是为了合群时的需要而加入了额外的码元。

信号编码不属于本书讨论的范围，不再详述。在这一章中，我们将扼要介绍数字信号的表示方法和基带传输、频带传输等问题，