

姚彦 梅顺良 高葆新等 编著  
中国通信学会主编 人民邮电出版社

# 通信工程 数字微波中继

通信工程丛书



通信工程丛书

# 数字微波中继通信工程

姚彦 梅顺良 高葆新等 编著

中国通信学会主编·人民邮电出版社出版

## 内 容 提 要

本书介绍数字微波中继通信的原理、设备与系统,包括:基带传输、载波键控传输、限带传输、无线视距传输、微波收发与天线设备、数字调制解调与同步设备、辅助电路、总体设计、工程设计和整机性能测试等,既说明了基本原理,又给出具体电路的设计考虑与实现方法。

本书适合于从事数字通信与微波通信工作的工程技术人员和大专院校通信与电子系统专业的高年级学生及研究生阅读。

通信工程丛书

### 数字微波中继通信工程

姚 彦 梅顺良 高葆新等 编著

责任编辑:俞天林 田秀兰

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 1990年8月第一版  
印张: 27 8/32页数: 436 1991年3月河北第2次印刷  
字数: 720千字 印数: 精 2 501-7 500 册  
平 2 001-5 000 册

精装ISBN 7-115-04233-0/TN·356

平装ISBN 7-115-04375-2/TN·405

精装定价: 14.40元

平装定价: 12.00元

## 丛 书 前 言

为了帮助我国通信工程技术人员系统地掌握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”，陆续出版。

这套丛书的主要读者对象是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、工程师和其它通信工程技术人员。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

## 前 言

数字微波中继通信是在数字通信与微波通信基础上发展起来的一种先进的通信传输手段，它兼有数字通信与微波通信两者的优点，如：容量大、上下话路方便、长途传输质量较稳定、投资较少、建站较快等，故受到世界各国的充分重视，并与光纤通信、卫星通信一起被称为现代通信传输的三大支柱。尽管国际上只有二十几年的发展历史，但目前无论在推广应用方面，还是在技术进展方面都取得了重大的成就。如：日本全国50%的长途电话和几乎100%的电视节目都采用微波中继系统，截止到1986年底，20%的长途传输系统采用数字微波。美国长途电信的70%采用微波中继系统，光是AT&T公司的6GHz微波站在全国就有3000多个。在欧洲，微波中继系统占全部电信业务的20~50%，而数字微波则占其中的20%。这些国家已完成13GHz频段以下、四次群容量以下的各种系列，推出了包括采用64QAM技术的最新产品，并积极准备条件在九十年代向256QAM过渡。

我国数字微波中继通信系统的研制开发是从七十年代中期原四机部组织的小容量数字微波通信系统工程开始的，只有十几年的发展历史，经历了小容量(2PSK)、中容量(4PSK)和大容量(16QAM和64QAM)三个发展阶段。目前小容量系统已在国内普遍推广应用，建设了二、三千公里的通信电路；中容量系统已具备生产能力，正在进一步开辟市场；大容量系统的技术开发已取得重要进展。据预测，我国在九十年代将要建设十几万公里以上的数字微波通信电路，并在提高自行开发设计能力和消化吸收国外先进技术的基础上推出国产的新一代数字微波中继通信产品。本书是作者及其

同事们参加我国数字微波通信系统研制与开发十几年工作的总结，也是在清华大学从事这个领域本科生与研究生教学工作的总结。希望本书能成为我国数字微波通信的同行及青年技术人员的有用的参考读物。

十年前，在邮电出版社的领导与编辑的关心与支持下，在清华大学吴佑寿教授的指导和参与下，我们总结了小容量数字微波的研制与开发经验，编写并出版了《数字微波中继通信》一书。这次新编写的书将注意保持原书理论联系实际的风格，着重介绍十年来发展较快的一些新技术，把内容重点放在中、大容量数字微波上，使原理介绍更加系统，设备与电路的说明尽量完整、实用。

本书共分三部分。第一部分为数字微波传输原理，包括基带传输、载波键控传输、限带信道上的传输和无线视距信道上的传输等四章，比较系统地给读者介绍有关数字微波传输的基本知识，这些内容对于从事数字通信其它领域研究工作的读者也有一定参考价值。第二部分为数字微波传输设备，共七章，即：微波发信设备、收信设备、天线设备、数字调制设备、解调设备、载波跟踪和位同步恢复电路，以及均衡、切换、勤务、接口等辅助电路，这是本书的中心内容。读者可以从中了解到数字微波各种主要设备与电路的组成原理、设计考虑及一些典型的实用例子。第三部分为数字微波传输系统，包括总体设计、整机性能测试与工程设计三章，主要介绍有关系统方面的一些基本知识。为了满足读者的不同要求，书中各章都附有参考文献，供有兴趣的读者进一步了解与研究时选用。

本书由姚彦主编。第一、二、三、四章由姚彦编写，其中第3.5、3.6节张忠革编写。第五、六章由高葆新编写，其中5.2.2节，叶琼编写，第5.4节洪兴楠编写，第6.4、6.5节南利平编写，第七章由钱建中编写，第八、九、十章由梅顺良编写，其中第10.6节金鑫编写，第9.4节张忠革编写。第十一章由刘序明、姚彦编写。第十二、十三章由姚彦编写，其中第13.5节杨知行编写。第十四章由吴晓宁编写。需特别指出的是，本书的编写与出版和清华大学无线电

电子学系通信和微波两个教研组的同事们的创造性工作是分不开的，我们的学生们在自己出色的论文工作中也为本书提供了不少有价值的材料。我们还要感谢石家庄54所、西安邮电4所、重庆716厂、北京506厂、中国电子系统工程公司等单位多年来对我们工作的支持。

对本书存在的错误、问题及其它不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

一九八八年七月

于清华大学

# 目 录

## 第一部分 数字微波传输原理

### 第一章 基带传输

1.1 引言 .....	( 3 )
1.1.1 数字信息的表示法 .....	( 4 )
1.1.2 多进制 .....	( 6 )
1.1.3 基带传输过程 .....	( 8 )
1.2 数字信号的功率谱密度 .....	( 10 )
1.2.1 用求自相关函数的方法 .....	( 11 )
1.2.2 用样本统计的方法 .....	( 17 )
1.2.3 几种常用的二进制基带数字信号的功率谱密度 .....	( 25 )
1.3 奈奎斯特准则——数字波形传输无失真条件 .....	( 26 )
1.3.1 奈奎斯特第一准则 .....	( 26 )
1.3.2 奈奎斯特第二准则 .....	( 34 )
1.3.3 奈奎斯特第三准则 .....	( 40 )
1.4 基带数字信号的最佳检测和比特差错率 .....	( 43 )
1.4.1 相加性高斯白噪声线性信道上的最佳检测 .....	( 43 )
1.4.2 基带数字信号传输的比特差错率 .....	( 47 )
1.4.3 存在码间串扰情况下的比特差错率 .....	( 52 )
1.4.4 基带传输响应的最佳化 .....	( 54 )
1.5 部分响应编码 .....	( 55 )
1.5.1 第一类部分响应编码—双二进制技术 .....	( 56 )
1.5.2 第四类部分响应编码—修正的双二进制技术 .....	( 59 )



1.5.3	部分响应信号的译码与预编码	( 61 )
1.5.4	部分响应信号的差错检测	( 63 )
	参考文献	( 65 )

## 第二章 载波键控传输

2.1	引言	( 66 )
2.1.1	数字信号的调制	( 66 )
2.1.2	数字信号的解调	( 70 )
2.2	键控信号的复包络分析法	( 73 )
2.2.1	键控信号的复包络	( 73 )
2.2.2	用复包络法求键控信号和窄带噪声的功率谱密度	( 74 )
2.2.3	键控信号通过带通信道	( 79 )
2.2.4	键控信号的正交相干解调	( 80 )
2.3	多相移相键控	( 82 )
2.3.1	多相移相键控信号的正交展开	( 82 )
2.3.2	多相移相键控信号的功率谱密度	( 85 )
2.3.3	相位逻辑与差分编码	( 88 )
2.3.4	相干解调与比特差错率	( 94 )
2.3.5	差分运算的差错扩散	( 101 )
2.4	正交移幅键控	( 104 )
2.4.1	概述	( 104 )
2.4.2	全响应正交移幅键控	( 105 )
2.4.3	部分响应正交移幅键控	( 109 )
2.4.4	参考载波的相位含糊度及解决方法	( 111 )
2.4.5	正交移幅键控信号的功率谱密度	( 116 )
2.4.6	正交移幅键控系统的比特差错率	( 117 )
2.4.7	正交移幅键控系统的正交串扰	( 125 )
2.5	连续相位移频键控	( 129 )
2.5.1	最小移频键控的工作原理	( 130 )

2.5.2	最小移频键控信号的功率谱密度	( 134 )
2.5.3	最小移频键控的相干检测和误码性能	( 137 )
2.5.4	其它的连续相位调制( <i>TFM</i> 、 <i>GMSK</i> )	( 139 )
	参考文献	( 143 )

### 第三章 限带信道上的传输

3.1	引言	( 144 )
3.2	发送谱的频域成形法	( 145 )
3.3	发送谱的时域成形法	( 150 )
3.4	限带传输的离散化模型和福尼等效系统	( 155 )
3.5	横向均衡器	( 160 )
3.5.1	横向均衡器的一般概念	( 160 )
3.5.2	峰值失真准则和迫零算法	( 161 )
3.5.3	均方误差准则和均方误差算法	( 164 )
3.5.4	横向均衡器的性能	( 168 )
3.5.5	分数抽头间隔的均衡器	( 170 )
3.6	判决反馈均衡器	( 175 )
3.6.1	判决反馈均衡器的一般概念	( 175 )
3.6.2	正交均衡器	( 177 )
3.6.3	自适应均衡的递推算法	( 180 )
3.6.4	差错传播与判决反馈均衡器的性能	( 182 )
	参考文献	( 185 )

### 第四章 无线视距信道上的传输

4.1	自由空间传输	( 187 )
4.1.1	视距与天线高度的关系	( 187 )
4.1.2	自由空间传输损耗	( 188 )
4.2	视距传播的大气效应	( 189 )
4.2.1	大气吸收衰减	( 189 )
4.2.2	雨雾衰减	( 190 )
4.2.3	大气折射	( 191 )

4.3	视距传播的地面效应 .....	( 193 )
4.3.1	费涅尔半径和余隙 .....	( 194 )
4.3.2	地面反射 .....	( 196 )
4.4	平衰落及其统计特性 .....	( 198 )
4.4.1	平衰落的瑞利分布特性 .....	( 198 )
4.4.2	衰落概率的计算公式 .....	( 200 )
4.4.3	衰落持续时间的计算公式 .....	( 202 )
4.4.4	分集接收 .....	( 202 )
4.5	频率选择性衰落及其统计特性 .....	( 203 )
4.5.1	多径传播的模型 .....	( 203 )
4.5.2	系统特征图 (signature图) .....	( 205 )
	参考文献 .....	( 207 )

## 第二部分 数字微波传输设备

### 第五章 微波发信设备

5.1	微波发信设备的组成与性能指标 .....	( 211 )
5.1.1	发信设备的组成 .....	( 211 )
5.1.2	发信设备的主要性能指标 .....	( 213 )
5.2	微波固态振荡源 .....	( 217 )
5.2.1	倍频链式固态源 .....	( 217 )
5.2.2	锁相式固态源 .....	( 224 )
5.2.3	介质稳频振荡器 .....	( 239 )
5.3	上变频器 .....	( 251 )
5.3.1	变容管上变频器 .....	( 252 )
5.3.2	双栅场效应管上变频器 .....	( 257 )
5.4	微波晶体管功率放大器 .....	( 265 )
5.4.1	微波功率放大器的基本特性 .....	( 265 )
5.4.2	砷化镓场效应功率晶体管 .....	( 270 )
5.4.3	场效应管功率放大器的设计方法与功率合成 .....	( 275 )

5.4.4	微波功率放大器的非线性特性	( 281 )
5.4.5	微波功率放大器的偏置与自动电平控制	( 294 )
	参考文献	( 296 )

## 第六章 微波收信设备

6.1	微波收信设备的组成与性能指标	( 293 )
6.1.1	收信设备的组成	( 293 )
6.1.2	收信设备的主要性能指标	( 300 )
6.2	微波晶体管低噪声放大器	( 303 )
6.2.1	低噪声放大器基本设计原理	( 303 )
6.2.2	低噪声场效应管放大器设计	( 315 )
6.2.3	计算机辅助设计	( 328 )
6.3	二极管混频器	( 344 )
6.3.1	混频器概述	( 344 )
6.3.2	混频器特性与主要指标	( 346 )
6.3.3	混频器电路设计	( 354 )
6.3.4	镜像噪声抑制	( 357 )
6.4	中频放大器	( 363 )
6.4.1	中频放大器的技术要求及电路形式	( 363 )
6.4.2	中频放大器的自动增益控制	( 371 )
6.4.3	薄膜集成与混合集成中频放大器	( 377 )
6.5	中频滤波器	( 380 )
6.5.1	中频滤波器的技术要求与组成方法	( 380 )
6.5.2	中频滤波器的计算机辅助设计	( 381 )
6.5.3	集总参数中频滤波器	( 386 )
6.5.4	声表面波中频滤波器	( 390 )
	参考文献	( 392 )

## 第七章 微波天线设备

7.1	微波通信对天线设备的要求	( 394 )
7.1.1	天线增益	( 394 )

7.1.2	天线方向图	( 395 )
7.1.3	天线阻抗	( 396 )
7.1.4	天线的寄生耦合	( 396 )
7.2	抛物面天线	( 398 )
7.2.1	抛物面天线基本原理	( 398 )
7.2.2	抛物面天线的主要性能指标	( 399 )
7.2.3	抛物面天线的馈源	( 403 )
7.2.4	卡塞格伦天线	( 406 )
7.2.5	喇叭抛物面天线	( 408 )
7.3	收发公用器	( 410 )
7.3.1	分波道滤波器	( 411 )
7.3.2	频率复用双极化收发公用器	( 414 )
	参考文献	( 417 )

## 第八章 数字调制设备

8.1	数字调制设备的组成与性能指标	( 419 )
8.1.1	数字调制设备的组成	( 419 )
8.1.2	数字调制设备的主要性能指标	( 422 )
8.2	移相键控调制的电路实现	( 426 )
8.2.1	中频二相平衡调制器	( 426 )
8.2.2	中频多相移相键控的正交调制器	( 433 )
8.2.3	中频多相移相键控的全数字式调制器	( 438 )
8.2.4	移相键控微波调相器	( 441 )
8.3	正交移幅键控调制的电路实现	( 450 )
8.3.1	全响应正交移幅键控的电路实现	( 450 )
8.3.2	部分响应正交移幅键控的电路实现	( 455 )
8.4	发送谱成形技术及电路实现	( 460 )
8.4.1	发送谱框架考虑	( 460 )
8.4.2	发送谱频域成形法的设计考虑及电路实现	( 465 )
8.4.3	发送谱时域成形法的设计考虑及电路实现	( 471 )

8.4.4 频谱成形声表面波滤波器 .....	( 477 )
8.5 数字调制误差的测试方法 .....	( 480 )
参考文献 .....	( 484 )

## 第九章 数字解调设备

9.1 数字解调设备的组成及性能指标 .....	( 486 )
9.1.1 数字解调设备的组成 .....	( 486 )
9.1.2 数字解调设备的主要性能指标 .....	( 490 )
9.2 数字解调设备中的单元电路 .....	( 492 )
9.2.1 相乘器电路 .....	( 492 )
9.2.2 基带检测器电路 .....	( 497 )
9.3 基带数字处理器及信号平面分割法 .....	( 506 )
9.4 基带均衡器的设计考虑和电路实现 .....	( 523 )
9.4.1 设计考虑 .....	( 523 )
9.4.2 实际电路举例 .....	( 524 )
9.5 延迟解调及其电路实现 .....	( 527 )
9.5.1 二相信号的延迟解调及其电路实现 .....	( 527 )
9.5.2 四相信号的延迟解调 .....	( 531 )
参考文献 .....	( 533 )

## 第十章 载波跟踪和位同步恢复电路

10.1 载波跟踪的基本原理 .....	( 534 )
10.2 锁相环的一些基本概念 .....	( 541 )
10.3 多相移相键控信号的载波跟踪 .....	( 546 )
10.4 多电平正交移幅键控信号的载波跟踪 .....	( 564 )
10.5 载波跟踪环的失锁检测及扩捕扫描 .....	( 577 )
10.6 载波跟踪环的计算机模拟方法和环路性能模拟 结果 .....	( 582 )
10.7 位同步的重要性及性能指标 .....	( 595 )
10.8 位同步信号的传送方法及提取原理 .....	( 599 )
10.9 位同步信息的产生方法 .....	( 606 )

10.10	位同步信噪比及其提纯方法	( 616 )
10.11	位同步恢复电路举例	( 626 )
	参考文献	( 629 )

## 第十一章 均衡、切换、勤务、接口及其它辅助电路

11.1	均衡与干扰抵消电路	( 631 )
11.1.1	空间分集组合器	( 631 )
11.1.2	中频自适应均衡器	( 637 )
11.1.3	中频自适应交叉极化干扰抵消器	( 652 )
11.2	备份与切换电路	( 656 )
11.2.1	备份工作原理	( 656 )
11.2.2	切换逻辑与切换电路	( 658 )
11.2.3	无损伤切换	( 660 )
11.3	勤务电路	( 665 )
11.3.1	勤务信号的传送方法	( 666 )
11.3.2	采用附加调频的勤务电路	( 667 )
11.3.3	主信道与勤务信道的相互干扰	( 674 )
11.4	数字接口电路	( 676 )
11.4.1	NRZ码接口电路	( 677 )
11.4.2	HDB3码接口电路	( 677 )
11.4.3	CMI码接口电路	( 681 )
11.5	误码监视电路	( 683 )
11.5.1	误码监视的几种方法	( 684 )
11.5.2	采用电平偏移法的伪误码监视电路	( 687 )
11.6	扰码与去扰电路	( 695 )
11.7	比特插入电路	( 698 )
11.8	前向纠错电路	( 700 )
	参考文献	( 709 )

### 第三部分 数字微波传输系统

#### 第十二章 数字微波中继系统的总体设计

12.1	引言	( 713 )
12.2	假设参考通道与传输质量标准	( 714 )
12.2.1	假设参考数字通道	( 715 )
12.2.2	误码性能	( 716 )
12.2.3	可用性	( 721 )
12.2.4	传输容量	( 722 )
12.2.5	基带接口	( 723 )
12.3	射频波道的频率配置	( 729 )
12.4	调制方式与传输恶化	( 732 )
12.4.1	调制方式的选择	( 732 )
12.4.2	传输恶化的定量分析	( 738 )
12.5	其它有关总体方案的一些考虑	( 746 )
12.6	性能估算与指标分配	( 749 )
	参考文献	( 757 )

#### 第十三章 数字微波中继系统的整机性能测试

13.1	微波收发信机性能测试	( 759 )
13.1.1	发信机性能测试	( 759 )
13.1.2	收信机性能测试	( 764 )
13.2	中频传输通道的性能测试	( 768 )
13.3	误码性能测试	( 770 )
13.3.1	码组发生器	( 770 )
13.3.2	误码仪	( 773 )
13.3.3	室内误码测试	( 777 )
13.3.4	现场误码测试	( 780 )
13.4	时钟抖动性能测试	( 781 )
13.4.1	时钟抖动测试原理	( 781 )
13.4.2	输出端最大剩余抖动的测试	( 789 )



13.4.3	输入端抖动容限的测试 .....	( 790 )
13.5	抗频率选择性衰落性能的测试 .....	( 791 )
13.5.1	多径衰落模拟器 .....	( 791 )
13.5.2	实验室模拟测量 .....	( 794 )
13.6	其它性能测试 .....	( 798 )
13.6.1	基带数字接口测试 .....	( 798 )
13.6.2	勤务信道测试 .....	( 799 )
13.6.3	切换性能测试 .....	( 799 )
13.6.4	电源测试 .....	( 800 )
	参考文献 .....	( 801 )

#### **第十四章 数字微波中继系统的工程设计**

14.1	工程设计指标 .....	( 802 )
14.2	路径效应的估计与控制 .....	( 805 )
14.2.1	路径的几何表述 .....	( 805 )
14.2.2	余隙标准与天线高度 .....	( 812 )
14.2.3	反射路径 .....	( 818 )
14.3	大气效应的估计和控制 .....	( 820 )
14.3.1	衰落储备与特征曲线 .....	( 821 )
14.3.2	平衰落与选择性衰落的中断率估算 .....	( 827 )
14.3.3	分集改善 .....	( 839 )
14.3.4	其它衰落引起的中断 .....	( 842 )
14.4	工程设计举例 .....	( 843 )
	参考文献 .....	( 850 )