

# 数字微波接力信道与电路

杨知行 编著

人民邮电出版社

## 内 容 简 介

本书介绍数字微波接力通信的传输信道，包括发信信道、收信信道和电波传播信道，及为保证系统正常运行的各种信道技术。书中既注意传输信道的基本原理、工程设计及系统性能的分析，也给出了设备中一些关键电路的设计方法和典型构成。

本书综合了微波电路技术、高频电路技术和数字微波通信技术间密切相关的內容。并着重于工程实用和最新进展，说理简明、通俗易懂。可供从事数字微波通信设计、生产、维护管理的工程技术人员和大中专院校有关专业的师生阅读。

### 数字微波接力信道与电路

杨知行 编著

责任编辑：赵立夙

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河南邮电印刷厂印刷

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      1988年1月第一版  
印张：16 24/32 页数：268      1988年1月河南第1次印刷  
字数：442千字      插页：1      印数：1—2000册

ISBN7115-03375-7/TN

定价： 3.70 元

# 前 言

数字微波接力通信是六十年代末、七十年代初迅速发展起来的一种先进的通信手段，它兼有数字通信和微波通信两者的优点。目前已在世界各国普遍采用，并将成为未来的综合业务数字通信网的一个重要组成部分。

数字微波接力通信本质上是一种数字通信，但它继承了模拟调频微波接力通信在信道技术（如：收发信技术、天线馈电线技术以及工作频段配置、传输线路设计等）方面的成果。同时，对传输信道的某些性能指标（如：信道的滤波特性、非线性特性、多径衰落、信道质量监视等）提出了新的要求。为了适应中、大容量数字微波通信系统的需要，一些新的信道技术，如：功放线性化技术、抗多径衰落技术、及其它各种自适应均衡技术等，近年来获得了迅速的发展。因此，无论对从事数字通信或从事微波部件与信道设备研制、生产、使用的工程技术人员，能够从数字通信和微波通信结合的角度了解一些数字微波接力通信的信道技术，将是有益的。

本书的主要目的是介绍数字微波接力通信的信道技术。全书共分六章，为便于读者阅读，其中第一、二章主要阐述数字微波接力通信系统在传输信道方面的特点和要求。第三、四章介绍微波收发信信道设备及部件的构成、基本原理、设计方法和典型电路。第五、六章分别介绍信道的性能测试和质量监视，以及传输信道的总体设计和设备实例。

本书的编写过程得到吴佑寿教授的关心和指导，我系冯重熙教授在编写过程中也曾给予热情的支持。肖华庭副教授和姚彦副教授审阅了全书，并对全书的内容和文字作了详细批改和指教。我系数字通信科研组和微波电路科研组的全体同事也给予了多方面的帮

助。在此，谨致衷心的感谢。

由于作者本人水平有限，书中还难免存在各种缺点和错误，诚望广大读者予以批评指正。

杨知行

于清华大学无线电电子学系

# 目 录

## 第一章 数字微波接力的信道特性

1.1 引言.....	( 1 )
1.2 传输信道的噪声 .....	( 5 )
1.2.1 热噪声 .....	( 5 )
1.2.2 接收机噪声系数 .....	( 6 )
1.3 误码率与眼图 .....	( 8 )
1.4 常用调制方式简介 .....	( 12 )
1.4.1 理想性能 .....	( 14 )
1.4.2 4PSK 调制解调电路原理 .....	( 16 )
1.4.3 其它几种调制电路的实现.....	( 24 )
1.5 信道的传输特性与信噪比 .....	( 31 )
1.5.1 相干检测系统的信噪比定义 .....	( 31 )
1.5.2 传输信道响应与信噪比的关系 .....	( 35 )
1.5.3 码间干扰 .....	( 41 )
1.5.4 信道传输特性的允许误差 .....	( 45 )
1.5.5 主要的几种频率干扰.....	( 53 )
1.6 传输信道的非线性失真及其影响 .....	( 58 )
1.6.1 信道非线性的一般数学表示 .....	( 59 )
1.6.2 非线性指标的几种定义 .....	( 62 )
1.6.3 非线性指标之间几个常用的关系式 .....	( 67 )
1.6.4 非线性信道的频谱扩展效应 .....	( 72 )
1.6.5 信道非线性对传输系统误码性能的影响.....	( 73 )

参考文献	( 77 )
<b>第二章 视距传播信道的衰落特性及自适应均衡技术</b>	<b>( 79 )</b>
2.1 引言	( 79 )
2.2 视距空间传播特性	( 80 )
2.2.1 自由空间传播损耗	( 81 )
2.2.2 空间传播的大气影响	( 82 )
2.2.3 空间传播的地面影响	( 88 )
2.3 多径衰落的统计特性	( 90 )
2.3.1 电平衰落的统计特性	( 91 )
2.3.2 交叉极化鉴别率	( 94 )
2.4 多径衰落的色散特性	( 96 )
2.4.1 多径衰落的双径模型	( 96 )
2.4.2 多径衰落的简化三径模型	( 100 )
2.4.3 简化三径模型中频模拟电路	( 102 )
2.5 多径衰落对系统误码性能的影响	( 104 )
2.5.1 频率选择性衰落对4PSK系统的影响分析	( 104 )
2.5.2 常用的几种调制方式对频率选择性 衰落的敏感性	( 112 )
2.5.3 多径衰落引起系统中断概率的分析	( 114 )
2.6 自适应均衡技术	( 116 )
2.6.1 空间分集技术	( 117 )
2.6.2 中频自适应均衡技术	( 124 )
2.6.3 自适应基带时域均衡技术	( 133 )
参考文献	( 137 )
<b>第三章 收信信道设备</b>	<b>( 139 )</b>
3.1 数字微波接力收信信道概述	( 139 )
3.2 小信号微波晶体管放大器	( 145 )
3.2.1 小信号微波硅双极晶体管	( 146 )
3.2.2 小信号微波场效应晶体管	( 149 )

3.2.3	微波晶体管的外特性参数 .....	( 152 )
3.2.4	微波晶体管放大器的性能分析 .....	( 155 )
3.2.5	小信号微波晶体管放大器的设计 .....	( 161 )
3.3	微波电路的计算机辅助设计 .....	( 173 )
3.4	微波收信混频电路 .....	( 181 )
3.4.1	收信混频器的主要电气指标 .....	( 182 )
3.4.2	几种实用的平衡混频器电路 .....	( 185 )
3.5	中频信号放大电路 .....	( 195 )
3.5.1	负反馈对管宽带放大电路 .....	( 197 )
3.5.2	差分对管宽带放大电路 .....	( 209 )
3.5.3	宽频带低噪声声单片集成电路 .....	( 211 )
3.5.4	主中放的组成与自动增益控制 .....	( 213 )
3.6	传输信道滤波器的工程设计 .....	( 216 )
3.6.1	微波交指带通滤波器的工程设计 .....	( 218 )
3.6.2	中频滤波器的计算机辅助设计 .....	( 226 )
	参考文献 .....	( 235 )
<b>第四章</b>	<b>发信信道设备</b> .....	<b>( 237 )</b>
4.1	数字微波发信信道概述 .....	( 237 )
4.2	微波线性功率放大器 .....	( 239 )
4.2.1	微波晶体管线性功率放大器的一般特性 .....	( 239 )
4.2.2	微波双极晶体管线性功率放大器设计 .....	( 241 )
4.2.3	微波场效应晶体管功率放大器 .....	( 251 )
4.2.4	行波管功率放大器 .....	( 256 )
4.2.5	微波负阻功率放大器 .....	( 260 )
4.3	改善微波功放线性的几种措施 .....	( 263 )
4.3.1	功率倒扣法与功率合成 .....	( 263 )
4.3.2	中频预畸变法 .....	( 268 )
4.3.3	前馈法 .....	( 274 )
4.3.4	自适应基带预畸变法 .....	( 279 )

4.4	发信电平自动控制电路	( 284 )
4.5	微波功率变频技术	( 290 )
4.5.1	变容管的基本特性和主要参数	( 290 )
4.5.2	功率上变频器	( 294 )
4.5.3	变容二极管倍频器	( 301 )
4.5.4	阶跃恢复二极管倍频器	( 308 )
4.6	微波振荡电路	( 317 )
4.6.1	微波晶体管振荡器	( 317 )
4.6.2	负阻振荡器的一般原理与电路	( 333 )
4.7	微波本振源的稳频措施	( 339 )
4.7.1	高Q腔稳频	( 339 )
4.7.2	注入锁相稳频	( 347 )
4.7.3	环路锁相稳频	( 352 )
4.7.4	脉冲取样锁相稳频	( 371 )
	参考文献	( 377 )
<b>第五章 传输信道的测量与监视</b>		( 384 )
5.1	基本测量	( 384 )
5.1.1	噪声系数测量	( 384 )
5.1.2	微波功率测量	( 389 )
5.1.3	驻波比测量	( 390 )
5.1.4	频率测量	( 395 )
5.2	系统测试	( 399 )
5.2.1	传播信道与天馈系统测试	( 399 )
5.2.2	传输信道测试	( 404 )
5.2.3	系统误码特性测试	( 409 )
5.3	传输信道的监视与切换	( 413 )
5.3.1	误码监视的必要性	( 414 )
5.3.2	误码监视的几种方法	( 415 )
5.3.3	传输信道的告警电路	( 436 )



5.3.4	传输信道的自动切换.....	( 438 )
5.3.5	自动切换性能测试.....	( 442 )
	参考文献.....	( 442 )
<b>第六章</b>	<b>传输信道工程设计与实例.....</b>	<b>( 444 )</b>
6.1	射频波道频率配置.....	( 444 )
6.1.1	波道频率配置的基本概念.....	( 444 )
6.1.2	传输信道的射频波道频率配置.....	( 446 )
6.2	传输信道性能估算.....	( 448 )
6.2.1	归一化信噪比的理论门限.....	( 451 )
6.2.2	归一化信噪比的实际门限.....	( 452 )
6.2.3	设备恶化量的分配.....	( 453 )
6.2.4	干扰恶化量分配及防护.....	( 459 )
6.3	传输信道电平余量的估算.....	( 463 )
6.4	2GHzPCM32/120路微波接力信道设备.....	( 467 )
6.4.1	主要技术指标.....	( 468 )
6.4.2	设备组成及工作原理.....	( 469 )
6.5	2GHzPCM 480路微波接力信道设备.....	( 484 )
6.5.1	主要技术指标.....	( 485 )
6.5.2	设备组成及部件指标.....	( 487 )
6.5.3	信道组合方式.....	( 498 )
6.6	4/5/6GHz200Mb/s微波接力信道设备.....	( 504 )
6.6.1	4/5/6L—D1系统性能指标.....	( 506 )
6.6.2	设备特点.....	( 512 )
	参考文献.....	( 522 )

# 第一章 数字微波接力的信道特性

传送信息的通道叫做信道。由于讨论问题的背景不同，对通道有各种划分方法。这里讨论的数字微波接力传输信道包括了电波传播信道、发信信道、收信信道，以及调制、解调终端的整个数字传输通道。

信道特性是系统设计的前提和依据。作为微波中继信道，主要考虑五个方面的特性。

1. 信道的噪声及干扰特性
2. 调制制式
3. 信道的传输特性
4. 信道的非线性特性
5. 信道的衰落特性

其中，信道的衰落特性将在第二章中专门讨论。同时为了叙述方便，本章还对数字微波中继系统有关质量标准的几个规定，以及几种常用的调制方式作了简单介绍。

## 1.1 引言

数字微波接力通信作为长距离干线通信方式，则必须有一个统一的质量标准。

近几年来，国际无线电咨询委员会（CCIR）和国际电报电话咨询委员会（CCITT）对数字微波接力系统的假想参考电路、传输质量标准和射频波道频率配置提出了一系列的建议和报告。根据这种情况，国际通信电路的质量标准和波道频率配置应符合国际上

有关建议。而一般用于国内的电路，则可以参照国际上的有关建议并结合国内的情况制订有关标准和规定。

为了对不同的通信线路规定一个统一的质量标准，便于比较各种通信设备的性能，预先规定一条假想的通信电路，并假定把通信设备安装在这条电路上，在这种条件下去考虑该系统的传输质量，通常就把这条通信电路称为假想参考电路。CCITT的G.721号建议<sup>[1]</sup>对64kb/s的数字电话规定了数字假想参考电路，分别列为如下四个系统：

(1)基群系统：传输速率为2.048Mb/s，电路总长250 km，均匀分为5个数字段，每段50公里，4次基带(64kb/s速率接口)转接。

(2)二次群系统：传输速率为8.448Mb/s，电路总长度为500km，均匀分为4个数字段，每段125km，8次基带转接。

(3)三次群系统：传输速率为34.368Mb/s，电路总长度为2500km，均匀分为9个数字段，每段约277.8km，2次基带转接，3次二次群转接，3次三次群转接。

(4)四次群系统：传输速率为139.264Mb/s，电路总长度及其分段与(3)相同，2次基带转接，3次三次群转接，3次四次群转接。

注意，其中的数字段系指相邻两个数字复接设备之间的区段，一个数字段可包括若干个微波接力段。

参照上述建议，我国有关部门曾制订过PCM与 $\Delta M$ 混合式的传输系列，见表1-1。按此规定，子群1和子群2的传输系统总长度为200公里，均匀分为10个再生接力段，每段20km。基群及非干线的二次群系统总长度为1000km里，均匀分为20个再生接力段，每段50km。二次群以上的干线系统总长度为2500km，均匀分为50个再生接力段，每段50km。

为了叙述方便，根据CCITT的分类，信道的传输容量大致分成三类：

表 1—1 我国数字微波接力通信系统的混合传输系列

级 别	速率 (Mb/s)	标 称 话 路
四 次 群	139.264	1920路PCM
三 次 群	34.368	480路PCM
二 次 群	8.448	120路PCM
基 群	2.048	30路PCM或64路 $\Delta M$
子 群 1	1.024	32路 $\Delta M$
子 群 2	0.512	16路 $\Delta M$

(1) 传输速率小于10Mb/s的系统, 称为小容量数字微波接力系统。

(2) 传输速率大于10Mb/s, 而小于100Mb/s的系统称为中容量数字微波接力系统。

(3) 传输速率大于100Mb/s的系统称为大容量数字微波接力系统。

误码率, 或称比特差错率, 这是衡量数字传输质量的最重要的指标之一。对此, CCIR作了两种规定<sup>[11]</sup>;

(1) 低误码率指标规定: 统计时间为1分钟的平均误码率大于 $10^{-7}$ 的时间百分数, 在任何月份都不应超过1%。这是在较长时间间隔内统计平均所得的误码率, 它决定了系统在大多数时间内的误码性能。这时候, 衰落的影响可以忽略, 误码主要由传输信道的码间干扰、设备恶化和来自其它传输系统的干扰造成。

(2) 高误码率指标规定: 统计时间为1秒钟的平均误码率大于 $10^{-8}$ 的时间百分数, 在任何月份都不应超过0.05%。这是在短時間间隔内统计平均所得的误码率, 它主要由于传播衰落所引起, 并规定了系统接力的误码门限, 因而确定了接力段的间隔。因此, 相对传输信道而言, 高误码率指标比低误码率指标显得更为重要。

应该指出，以上误码率指标是为通信电路系统设计时用的，并且是按前面规定的假想参考电路定义和测试的。因此，值得说明误码率指标在每一个接力段上的分配情况。

首先，我们假定：

(1) 全程共有  $m$  个再生接力段，其特性都相同。

(2) 信道衰落是造成高误码率的主要原因，而各个接力段的衰落是相互独立的。

(3) 传输信道的码间干扰及来自其它传输系统的干扰是造成低误码率的主要原因，而在低误码的统计时间间隔内，这些干扰具有平稳且各态遍历性。

然后，令全程超过高误码率  $P_{eH}^{(m)}$  的时间百分数为  $k_H^{(m)}$ ；分配给每个接力段为  $P_{eH}^{(1)}$  和  $k_H^{(1)}$ 。同样，全程超过低误码率  $P_{eL}^{(m)}$  的时间百分数为  $k_L^{(m)}$ ，分配给每个接力段为  $P_{eL}^{(1)}$  和  $k_L^{(1)}$ 。

根据前面的假定条件，可以近似认为：

$$\left. \begin{aligned} P_{eL}^{(1)} &= \frac{1}{m} P_{eL}^{(m)} \\ k_L^{(1)} &= k_L^{(m)} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{eH}^{(1)} &= P_{eH}^{(m)} \\ k_H^{(1)} &= \frac{1}{m} k_H^{(m)} \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

式 (1.1) 和 (1.2) 的意思是：低误码率指标按误码率数值在各个接力段均匀分配，而时间百分数不变；高误码率指标按时间百分数在各个接力段均匀分配，而误码率数值不变。

数字微波接力通信系统的主要质量指标涉及很广。除了上述传输容量和误码指标以外，还有定时抖动、频谱利用率、频率配置、接口等等。这些性能标准既是系统设备总体设计的依据，也是衡量传输信道的性能好坏的标准。围绕对传输系统的误码性能等指标的影响，下面将要讨论传输信道的几个主要特性。

## 1.2 传输信道的噪声

一般地说,传输信道中有许多潜在的噪声源,它们可分为设备内部和设备外部噪声源两类。外部噪声有大气噪声,银河系噪声和各种人为噪声。在载波频率达到微波频段的传输信道中,设备外部噪声影响很小,可以忽略不计。设备内部噪声主要是指热噪声和本振噪声。相对热噪声而言,本振噪声影响较小,通常被当作一种干扰在信道指标分配时予以考虑。这样,热噪声是传输信道特征噪声。

### 1.2.1 热噪声

热噪声是导体中电子的随机运动所产生的一种电噪声。对于工程实用的目的来说,可用下式计算电阻两端所产生的热噪声电压的均方值。

$$E \left[ V_N^2 \right] = 4kTR\Delta f \quad (V^2) \quad (1.3)$$

式中 $\Delta f$ 是测量带宽,以Hz为单位; $k$ 是玻尔兹曼常数, $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $T$ 是以K表示的绝对温度; $R$ 是以 $\Omega$ 为单位的电阻值。

由于电阻中电子的数目是非常大的,同时电子的随机运动也是相互独立的,由中心极限定理可以证明,热噪声服从均值为零的正态分布。

为了数学分析方便,通常定义一种白噪声作为热噪声的理想噪声模型。白的含义是比拟白色光中以等幅的方式包含了电磁辐射可见光频带中的全部频率。设它的功率谱密度与工作频率无关,则白噪声 $W(t)$ 的功率谱密度可以用下式表示:

$$S_w(f) = \frac{N_0}{2} \quad (1.4)$$

这是以载波为中心的双边谱密度的表示式。如果在等效基带中考虑的是单边谱密度,则有:

$$S_w(f) = N_0$$

图 1—1 (a) 中示出白噪声的功率谱密度。如果取  $N_0$  为接收信道的输入端口的功率谱密度，它等于：

$$N_0 = kT_e \quad (1.5)$$

式中  $T_e$  是接收信道的等效噪声温度，通常称为接收机等效噪声温度。

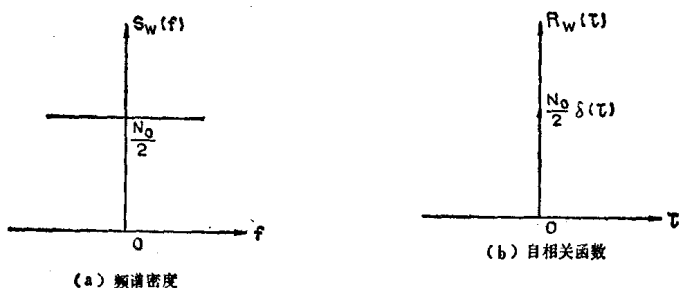


图 1—1 白噪声的特性

取白噪声功率谱密度的付立叶反变换，可以得到它的自相关函数为：

$$R_w(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau) \quad (1.6)$$

可以看出，白噪声的自相关函数是一个加权系数为  $\frac{N_0}{2}$ ，在  $\tau = 0$  处的冲激函数，如图 1—1 (b) 所示。

严格地说，白噪声的功率是无限大的，因此，它不是物理上可实现的。一般只要一个热噪声源具有的功率谱宽度远远超过它所作用的信道带宽，并且能全部覆盖信道带宽，其谱密度基本上可以作为常数考虑，就可以采用白噪声模型。

### 1.2.2 接收机噪声系数

接收机噪声系数是度量一个收信信道的热噪声特性的指标。图 1—2 将收信信道作为一个二端口网络，其输入端与内阻抗为

$Z(f) = R(f) + jX(f)$ 的信号源 $V_s(t)$ 相连接。噪声电压 $V_N(t)$ 代表由信源内阻 $R(f)$ 产生的热噪声。收信信道输出的噪声由两部分组成，一部分是信号源中带来的，主要是收信馈线系统的损耗产生的接收热噪声。另一部分则是收信信道设备本身产生的。这里定义接收机噪声系数为：

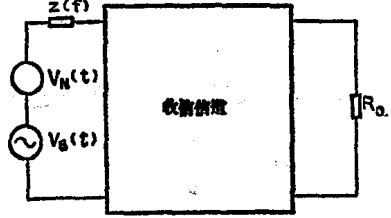


图 1-2 收信信道等效网络 (1.7)

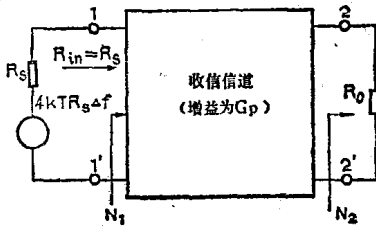
$$N_F = \frac{S_{NO}}{G_p S_{NS}}$$

式中： $S_{NO}$ 表示收信信道输出的总噪声功率， $S_{NS}$ 表示由收信信道输入端噪声源 $V_N(t)$ 所产生的噪声功率， $G_p$ 表示收信信道的总的功率增益。

假如收信信道本身不存在热噪声，则 $S_{NO} = G_p S_{NS}$ ，这时接收机噪声系数等于 1。但对一个实际的收信信道来说， $S_{NO}$ 总是大于 $G_p S_{NS}$ ，所以其接收机噪声系数总是大于 1 的。

用噪声系数 $N_F$ 来描述具有比较理想噪声特性的收信信道的缺点是，所得的数值都很接近 1，故很不方便。在这种场合下，采用等效噪声温度 $T_e$ 来描述要方便得多。

图 1-3 表示一个输入电阻与信号源内阻 $R_s$ 相匹配的收信信道



与信源内阻 $R_s$ ，以及由 $R_s$ 产生的噪声源。根据式(1.3)，该噪声源的电压均方值为 $4kTR_s\Delta f$ 。由此可知，收信信道的输入噪声功率是：

$$N_1 = kT\Delta f \quad (1.8)$$

图 1-3 与输入信源阻抗匹配的收信信道

同时，定义 $N_d$ 为收信信道本身产生的那一部分热噪声功率，则有：



$$N_d = G_p k T_e \Delta f \quad (1.9)$$

式中符号前面已有定义。由此可以得到收信信道总的噪声输出功率为：

$$N_2 = G_p N_1 + N_d = G_p k (T + T_e) \Delta f \quad (1.10)$$

根据接收机噪声系数的定义， $N_F$ 也可以表示成：

$$N_F = \frac{N_2}{G_p N_1} = \frac{T + T_e}{T} \quad (1.11)$$

因此，收信信道的等效噪声温度和接收机噪声系数之间有如下互换关系：

$$T_e = T (N_F - 1) \quad (1.12)$$

应用式(1.12)的条件是： $N_F$ 必须是在输入端达到匹配时测出的， $T$ 是测试温度，单位是K。

### 1.3 误码率与限图

对于传输系统而言，误码率是理论分析和性能测量最直接的质量指标。而传输信号的眼图却是检查传输信道畸变的一种最直观而且形象的方法。

#### 一、误码率

实际的数字微波接力系统比较复杂，使误码率计算非常困难。因此，我们假定传输信道是理想的，只考虑白色正态分布噪声的影响，解调器输出的基带信号是幅度为 $V_p$ 的正负脉冲，如图1—4所示

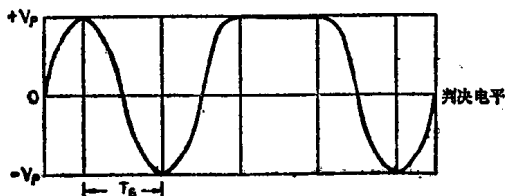


图 1—4 随机基带信号