

全国高技术重点图书 • 通信技术领域

大容量数字微波传输 系统工程

陈如明 著



人民邮电出版社

全国高技术重点图书·通信技术领域

大容量数字微波传输系统工程

陈如明 著

JS66/17

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书较完整地论述了大容量数字微波传输系统工程的现代信号与系统设计的基本理论和工程问题。全书共分 17 章, 内容包括: 传输性能分析, 信号设计与信号检测, 信号处理, 编码调制, SDH 数字微波与数字卫星传输等系统设计、构成基本理论; 宽频带、高线性微波收发信, 高速多状态调制, 自适应同步解调, 自适应均衡, 自适应无误码倒换, 微波帧复接, 公务传输, 微机化远程监控, 自适应分集接收, 衰落模拟, 电波传播数据采集、分析、处理, 现代设备电源等一系列基本技术。本书最后还给出了系统工程总体设计方法与示例。

本书内容丰富, 概念清晰, 取材新颖, 论述全面, 以作者科研成果为基础, 注意理论联系实际, 可供相关专业的科研开发人员、工程技术人员、管理人员、维护人员及高等院校相关专业师生参考使用。

全国高技术重点图书·通信技术领域 大容量数字微波传输系统工程

◆ 著 陈如明

责任编辑 王晓丹

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

北京鸿佳印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 850×1168 1/32

印张: 40.25 插页: 1

字数: 1058 千字 1998 年 9 月第 1 版

印数: 1-2500 册 1998 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN7-115-06762-7/TN·1263

定价: 68.00 元

《全国高技术重点图书》 出版指导委员会

主 任： 朱丽兰

副主任： 刘 果 卢鸣谷

委 员： (以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	王守武	牛田佳	卢鸣谷
叶培大	刘 仁	刘 果	朱丽兰	孙宝寅
师昌绪	任新民	杨牧之	杨嘉墀	陈芳允
陈能宽	张钰珍	张效详	罗见龙	周炳琨
欧阳莲	赵忠贤	顾孝诚	谈德颜	龚 刚
梁祥丰				

总干事： 罗见龙 梁祥丰

《全国高技术重点图书·通信技术领域》 编审委员会

主 任： 叶培大

委 员： 陈俊亮 徐大雄 姚 彦
程时昕 陈芳烈 李树岭

序

原邮电部第四研究所总工程师、主任高级工程师陈如明教授,作为“七五”国家重点科技攻关项目“6GHz1920 路大容量数字微波通信系统”的总项目负责人,在各级领导的大力关注与支持下,与广大科技人员紧密合作,从该项目可行性研究立项论证开始,经过总体设计,软、硬件攻关研制,总调、总测,直至全套系统室内测试国家鉴定与野外现场试验国家验收全过程,成功地完成了这一艰巨任务,获得了多项国家奖励,及时为我国大容量数字微波研究工作跨入世界 80 年代中期先进水平行列作出了重要贡献。此前,陈先生曾参与过多项国家、部、院级微波与卫星通信的科研工作,并在美国斯坦福(Stanford)大学单独从事并成功地完成了美国宇航局(NASA)研究合同 NAS3-151 及博士研究生指导工作。陈先生还是国际电联原 CCIR 第 4 研究组(卫星组)与第 9 研究组(无线中继组)第一篇中国文摘提供者及多状态调制、干扰计算方法等重要 CCIR 报及、建议书最终版本全面修订定稿的主要贡献者。后来又作为世界上最大的商业卫星组织 INTELSAT 的中国董事,积极参与董事会活动,捍卫我国权益,评审世界上最新的一系列通信卫星的方案设计可行性与合理性及其市场竞争能力的有效性,从而积累了大量理论知识与实践经验。陈先生至今已在国内外发表了 60 余篇论文及两本论著,具备了书写这本技术难度较高、猎涉面广的专著——《大容量数字微波传输系统工程》的坚实基础。从参考文献栏即不难理解本书确实反映了作者 30 多年来辛勤劳动的一系列研究成果;同时,纵观全书,容易发现作者在数字微波、卫星通信、信号分析、信号设计、信号检测、自适应信号处理、编码调制、干扰协调、全球

个人通信及系统工程总体设计等领域有着深厚的功底；而且，系统设计方法、分系统方案配置和优化选择，软、硬件有机组合等方面与实际工程需要紧密相结合，充分体现出从系统工程观点进行系统设计的明显目标与特征。另一方面，未来信息社会的主要特点是宽带化、智能化及个人化，并密切伴随视频图像业务为轴心的多媒体世界。无疑，骨干传输媒体为大容量陆地或海底光缆；然而，作为初期投资较省、资本回收较快、施工建设较容易、组网机动、灵活性强并具备潜在无缝隙覆盖能力的大容量数字微波与数字卫星通信手段，在未来全球/区域/国内信息高速公路建设中必将成为光纤通信的重要支持与补充手段。因此，从信息高速公路观点以及系统工程方法论观点看，可以期望，本书将会对不少领域——甚至超越无线传输领域的工程技术人员及院校师生有一定的参考价值。

中国科学院院士
北京邮电大学名誉校长

叶培大 教授

前 言

在各级领导的关注与支持下，本人以“七五”国家重点科技攻关项目“6GHz 1920 路大容量数字微波通信系统”取得的成果与体会为基础，并结合以往在国内外长期从事数字微波通信与卫星通信科研工作的经验，把理论工作与工程实践有机结合，撰写了这本大容量数字微波传输系统工程专著。书中尽量用易于理解的语言，阐明以大容量数字微波传输为主，并兼顾大容量数字卫星的大容量数字无线传输的一些基本概念及构成方法，并从系统工程观点的较高立足点出发，较完整地讨论了其整套信号分析、信号设计、信号检测、自适应信号处理及系统工程总体设计等基本理论与设计方法。

本书主要特点为：1. 尽可能每章有一定自封闭性，以利读者按自己的需要阅读相关内容；2. 重视概念、方法的较深入讨论，保持一定程度的完整性，并具可读性；3. 特别注意有战略意义与广泛应用价值的新概念与新技术的介绍与讨论，一系列自适应信号处理技术、编码调制技术及复杂环境下的信号检测技术等深入讨论即为其例；4. 重视工程实施方案的对比与实用设计方法的介绍，以有助于读者展开广阔的设计思路；5. 系统地反映本人 30 余年来在国内外从事一系列科研工作的相关进展与成果；6. 重视软、硬件有机结合及引入必要的数学运算与理论解析，以支撑工程设计的科学性和严密性；7. 引证一定数量的参考文献，作为更深入研讨的参考。

应该指出，虽说本书是以笔者科研进展与成果为中心的专著，但实质上这是集体劳动的充分反映。首先，“七五”国家重点科技攻关这一艰巨任务的完成即是集体劳动的结晶；其次，本书有不少章节也是依靠集体劳动才得以完成，例如，第七章由傅梅卿执笔完成，第

十四章由高永龙及郭强执笔完成，第十五章由罗森执笔完成。这些章节，从工程设计与实施及在大系统中研制开发的核心作用与完整配套而言均十分重要。而且，系统分析、设计软件包的完成还要感谢本人在美国斯坦福(Stanford)大学从事与完成美国宇航局(NASA)科研合同工作期间 Lusignan 教授给予的大力帮助与指点，正是这些帮助与指导奠定了此软件开发中通用计算方法得以完善的坚实基础；同时亦应感谢与本人密切、有效合作的五位研究生张晓丽、熊飞、袁丁、杨洁与张静及浙江大学信息与电子工程学系的诸多教授、老师们。还应特别指出，在我挥笔作此前言的前前后后，思绪万千，我将永远缅怀与哀念为此“七五”攻关项目注尽心血但现已永远离开了我们的邮电部四所老所长，主任高级工程师谢碧华同志。如果说这本书对今后从事有关工作的工程技术人员与院校师生能有所裨益的话，无疑，这首先包含着这位永远令人缅怀的老所长的心血与巨大贡献在内！

此外，由于本书书写延续时间长，给出版社与编辑同志的工作带来了诸多困难。在此对他们热心帮助与合作表示由衷的感谢，并深表歉意。

由于本人水平有限，兼之大篇幅成稿依然匆草，错误不当之处定然难免，敬请批评指正。

陈如明

符 号 表

a Rummler 模型平衰落参数
 $A(f)$ 幅频响应
 $\{a_k\}$ 数字传输信号集
 α Nyquist 滚降系数
 $\{\alpha_k(t)\}$ 复包络信号取样集
 (同相分量)
 α_d 信噪比固定恶化因子
 α_i 干扰滤波因子
 α_r 衰落中断概率叠加因子
 η 效率, 或深衰落期间多径发生概率
 η_a 天线效率
 η_r 编码调制等效多余度
 b Rummler 模型回波振幅参数
 B_N 噪声带宽
 β 群频界域比($=F_m/\check{F}_m$)
 $\{\beta_k\}$ 复包络信号取样集(正交分量)
 $Be^*(f)$ 归一化预加重特性
 C 载波功率, 或信道容量
 $\bar{C}$ 归一化信道容量
 $C_{kti} = (C/N)_{i \cdot Bi}$
 C/N 载噪比

C/I 载干比
 C/N_0 载波功率与噪声功率谱密度之比
 C/T 载波功率与噪声温度之比
 $(C/N)_0$ 恒定载噪(干)比
 $(C/N)_v$ 变动载噪(干)比
 $(C/N)_0$ 正常接收信噪比
 $(C/N)_{\min}$ 指定门限误码要求下的最低 (C/N) 要求
 $(C/N)_{IM}$ 交调信噪比
 d 距离
 d_h 汉明距离
 d_f 信号自由距离
 $d_{\min}$ 最小信号距离
 $D(f)$ 时延响应
 D_n FDM-FM 信号剩余载波强度因子
 $D_{\max}$ 最大时延
 D_T 总固定恶化量
 $\delta(x)$ Dirac-Delta 函数

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi x t} dt$$

δ_m^n Kronecker—Delta 因子

$$= \begin{cases} 1 & (m=n) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases}$$

δ_{ps} 静态相位误差

δ_{pj} 相位抖动

ΔL_{ii}^d 下行传输衰落储备

$\Delta C/N$ 信噪比恶化量

$(\Delta C/N)_i$ 第 i 类信噪比恶化量

$(\Delta C/N)_{cr}$ 相互交调作用信噪比恶化量

$(\Delta C/N)_\Sigma$ 组合信噪比恶化量

ΔE_i 第 i 类等效眼图恶化量

Δ 自适应调节步长

$E\{x\}$ 对 x 的期望(统计平均)运算

E_b/N_0 每比特信号能量与噪声功率谱密度之比

$$(E_b/N_0)_{\min} = \ln 2$$

$\epsilon(t)$ 失真波

ϵ_n Neumann 因子

$$= \begin{cases} 1 & (n=0) \\ 2 & (n \neq 0) \end{cases}$$

$\operatorname{erfc}(x)$ 补误差函数

$$= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$$

$\operatorname{erf}(x)$ 误差函数

$$= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

$$\operatorname{erf}(x) + \operatorname{erfc}(x) = 1$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \\ = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})$$

f_c 载波中心频率

f_0 Rummmler 模型的中心频率参数,或凹口频率

f_b 比特时钟频率

f_s 符号时钟频率

f_N Nyquist 频率

$F_m, F_{\bar{m}}$ 群频最高、最低频率

f^* 对 F_m 的归一化频率

$\varphi(t)$ 相位调制(或 $\Phi(t)$)

$\varphi(x)$ 误差函数或归一化正态

$$\text{分布密度} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$$

G_A 天线增益

G_C 编码增益

G_{CFM} 多维星座优质指数增益

$g_c(t), g_s(t)$ 同相、正交调幅信号

G_s 系统增益

$G(f)$ 功率谱密度函数

$G(\phi), G(\theta)$ 卫星、地球站天线方向图函数

$G(\sigma=1, \sigma_d)$ FDM-FM 信号的
归一化连续功率
谱密度函数

$\Gamma(z)$ Γ 函数

$$= \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt$$

($\text{Re}(z) > 0$)

G/T 接收系统优质指数

$H(f)$ 传输函数, 或数字信号
对调频-频分模拟信号
干扰影响的归一化功
率谱密度函数

$H(s)$ 复 s 平面的传输函数表
达式

$H_p(\omega)$ 网孔均衡传输函数

h_i CPM 信号的调制指数

$h(\tau)_i$ Signature 矩形逼近的第
 i 点高度

$H_n(x), h_n(x)$ n 阶 Hermite 多项
式

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} (e^{-x^2})$$

$$h_n(x) = (-1)^n e^{x^2/2} \frac{d^n}{dx^n} (e^{-x^2/2})$$

I 平均信息量, 或干扰信号

I_s 计及衰落动态效应及设备
滞后效应的中断概率修正
因子

I_{fd} 频率分集改善系数(或 I_f)

I_d 平衰落空间分集改善系数

$(I.R.)_T$ 总隔离比

$I_\nu(z)$ 第 1 类 ν 阶修正 Bessel
函数

$$= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\frac{1}{2}Z)^{\nu+2m}}{\Gamma(\nu+m+1)m!}$$

K 绝对温度

k Boltzmann 常数 ($= 1.38 \times$
 10^{-23} 焦耳/K)

K_d 鉴相灵敏度

K_v 压控灵敏度

$K(t, \tau)$ 一般随机过程相关函
数

$K(\tau)$ 平稳随机过程相关函数

$k(t)$ 干扰振幅与信号振幅之
比

k_λ Signature 的面积系数

ξ 锁相环参数阻尼因子, 或条
件误码参量过程 $\xi(t)$ 简写,
或对 $F_{\dot{m}}$ 、 $F_{\ddot{m}}$ 的归一化频率

$$= \frac{f - F_{\dot{m}}}{F_{\ddot{m}} - F_{\dot{m}}}$$

ξ_1, ξ_2 多种因素相互作用时的
协合增强因子

L_s 传输损耗

L_f 馈线损耗

L_b 分路损耗

L_p 传播通路衰耗
 L_u 、 L_d 上、下行线传播衰耗
 L_{ij} i 至 j 的传播通路衰耗
 $\rho = \sqrt{C/N}$
 $\rho_{\Delta f}$ Nyquist 带宽相关系数
 λ 波长, 或反射波相对强度系数 $\lambda = 1 - b$
 $\lambda_{MP}(f_0, \tau)$ 、 $\lambda_{NMP}(f_0, \tau)$ 最小相位及非最小相位状态时延为 τ 的 Signature 曲线
 Δ 最大似然比
 M 调制电平数或调制状态数
 m 高斯随机变量的均值
 M_e 多路随机调频波的有效调制指数 ($= \Delta f_e / F_m$)
 m_e 多路随机调频波的载波功率指数因子 ($= M_e^2 \beta$)
 M_r 降雨储备 ($= F_{mr}$)
 M_{th} 门限储备
 M_{ij} 对指定传输质量的 i 至 j 通路的所需限定的 C/I 大小
 N 噪声功率
 N_0 噪声功率谱密度
 N_C 话路数
 N_F 噪声系数
 Ω_c 中断计算等多维积分空间

P_{be} 比特误码率
 P_{se} 符号误码率
 P_{BE} 码块误码率
 P_d 色散中断概率
 P_T 发射功率, 或组合中断概率
 P_N 热噪声功率
 P_R Rayleigh 衰落发生因子 (概率)
 $P(K:1)$ m 个倒换段, 每段 n 个区间的 $K:1$ 波道备份全线可靠工作概率
 P_{so} 自由空间收信电平
 P_{th} 门限电平
 $P_{e|\xi}$ 对 ξ 的条件误码率
 P_{ep} 测试电平为 p_c 点的话路噪声功率
 P_{eRs256} 256 状态圆滑阶梯包络星座的 QAM 调制的符号误码率
 P_{in} 带内凹口发生概率
 P 设备可靠工作概率
 p_{MP} 、 p_{NMP} 最小相位及非最小相位衰落发生概率
 p_{SBI} 、 p_{SBo} 衰落凹口落在带内及带外的中断概率值
 q 设备不可靠工作概率 ($= 1 - p$)

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})$$

R 码速

r 或 r_i (编)码率

r_p 信号峰值系数

$r_s(R)$ 多维星座成形增益

$r(x, \alpha \sim \beta)$ 带通切割函数

$$= \begin{cases} 1 & \alpha \leq x \leq \beta \\ 0 & x < \alpha, x > \beta \end{cases}$$

$r(t, \tau)$ 矩形窗函数

$$= \begin{cases} 1 & |t| \leq \tau/2 \\ 0 & |t| > \tau/2 \end{cases}$$

$r_c(\Lambda)$ 高维编码增益

R_b 比特速率

R_s 符号速率

r_z 总等效码率

S_i 二维平面信号矢量点

S/N 信噪比

σ 归一化角频率($=f/F_m$)

σ^2 高斯随机变量离散

σ_N^2 白噪声功率($=N_0 B_N$)

$\sum_i'$ 排除 $i=0$ 项的求和运算

$\hat{S}$ 信号 S 的估值

$S_i(x)$ 正弦积分

$$= - \int_x^{\infty} \frac{\sin t}{t} dt$$

$\operatorname{sgn}(x)$ 符号函数

$$= \begin{cases} +1 & x > 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

T_e 等效噪声温度

T_b 比特间隔

T_s 符号间隔

T_0 绝对温度

T_{oi} 反映不同 τ 时 $h(\tau)_i$ 值的
标度因子

$T(x, z)$ 误码双重积分函数

T_{AH}^* 无误码倒换自适应时延
调节范围

τ Rummler 模型相对时延参数

τ_0 平均区间时延, 或 Rummler
模型中 $B_f = 26.4 \text{ MHz}$ 时的
对应 τ 值即 $\tau_0 = 6.3 \text{ ns}$

$u_i(t), u_o(t)$ 一般输入、输出信
号

$U(t)$ 基带信号

U 干扰(不需要)信号功率

W_f 波形失真系数

$W_f T_s$ 归一化波形失真系数

W_s 卫星天线口面的输入功率
通量密度

Y 载波因子

Z_0 线性振幅色散大小(dB)
特种数学符号

$\rightarrow$ 趋向

$\div \rightarrow$ 对应

$\doteq$ (或 $\approx$) 近似等于

$\cong$ 渐近等于

$\equiv$ 恒等

$\triangleq$ 定义等于

$\propto$ 正比

$O(f(z))$ $f(z)$ 的阶

$[x]$ 小于等于 x 的最大整数

$\oplus$ 模二相加运算, 或 N 维立方体含义(下标)

$\otimes$ 线性相乘运算, 或 N 维球体含义(下标)

$\|S_i - S_j\|$ 矢量 S_i 与 S_j 间的距离

$\|X\|$ 欧氏空间(有限维实酉空间)的 N 维矢量 x 的范数或模

$\|x\|^2$ N 维星座点 x 的能量

$\overline{X(t)}$ 对 $X(t)$ 的统计平均 $= E[X(t)]$

$\widetilde{X(t)}$ 对 $X(t)$ 的时间平均 $= \langle X(t) \rangle_t$

$\overline{\widetilde{X(t)}}$ 对 $X(t)$ 的时间与统计平均

X 列矢量

$$= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$K(\tau)$ 相关矩阵

$$= \begin{bmatrix} k_{11} k_{12} \cdots k_{1n} \\ k_{21} k_{22} \cdots k_{2n} \\ \vdots \\ k_{n1} k_{n2} \cdots k_{nn} \end{bmatrix}$$

$\sim$

A 矩阵 A 或矢量 A 的转置

A^{-1} 矩阵 A 的逆

I 单位阵

Λ 对角阵, 或 N 维格点集

Q 正交阵

$\det A$ 阵 A 的行列式

$\bmod M$ 模 M

$\in$ 属于, $a \in A$ 即 a 属于集 (合) A 的元素

$\notin$ 不属于

$\cup$ 和(并)集, 当一个集族的全部集为 $A, B, C, \dots$, 则其和集即为 $A \cup B \cup C \cup \dots$, 例如 $\{1, 2, 3\} \cup \{0, 2, 4\} \cup \{2, 1\} = \{0, 1, 2, 3, 4\}$

$\cap$ 交(通)集, 当一个集族的全部集为 $A, B, C, \dots$, 则其交集即为 $A \cap B \cap C \cap \dots$, 例如, $\{1, 2, 3\} \cap \{0, 2, 4\} \cap \{2, 1\} = \{2\}$

$A \times B$ A 集与 B 集的笛卡尔乘积例如, 设 $A = \{x_h | h \in H\}$,

$$B = \{y_k | k \in K\}$$

集合 $\{\langle x_h, y_k \rangle | x_h \in A \text{ 且 } y_k \in B\}$ 即为其笛卡尔乘积 $A \times B$.

目 录

第一章 数字传输引论	(1)
1.1 数字信号及有关基本定义	(1)
1.2 数字信号传输码型	(5)
1.3 数字信号传输系列.....	(11)
1.4 基带数字传输原理.....	(12)
1.4.1 码间干扰及眼图	(12)
1.4.2 Nyquist 准则与 Nyquist 滤波特性的 最佳分配	(15)
1.4.3 基带传输的误码率	(27)
1.4.4 匹配滤波	(30)
1.4.5 基带时域均衡.....	(32)
1.5 通带数字传输原理.....	(36)
1.5.1 数字调制解调的一般概念	(36)
1.5.2 通带传输的最佳检测概念与误码率.....	(42)
1.6 大容量无线数字传输引论.....	(50)
1.6.1 大容量数字微波传输系统模型	(50)
1.6.2 大容量无线数字传输与未来通信网构 成的基本关系	(52)
1.6.3 大容量无线数字传输的一些主要技术问题.....	(55)
1.6.4 当代大容量无线数字传输的基本特点 与主要发展动向.....	(58)
第二章 传输分析	(63)
2.1 传输信号的波形分析.....	(63)

2.2	传输信号的功率谱分析.....	(70)
2.2.1	功率谱分析方法.....	(70)
2.2.2	功率谱分析的一些重要公式与结果.....	(72)
2.3	热噪声、干扰、失真同时作用下的误码分析	(83)
2.3.1	分析计算方法分类.....	(83)
2.3.2	热噪声、干扰、失真作用下的 <i>MPSK</i> 系统的误码率分析.....	(85)
2.3.3	热噪声、干扰、失真作用下的 <i>MQAM</i> 系统 的误码率分析.....	(96)
2.4	频率选择性衰落的中断预测分析	(106)
2.4.1	传播模型及有关统计参数	(107)
2.4.2	频率选择性衰落的对抗措施	(112)
2.4.3	Signature 的概念	(113)
2.4.4	频率选择性衰落的中断预测	(114)
2.5	射频干扰分析	(126)
2.5.1	FDM-FM 系统间的干扰	(128)
2.5.2	模拟或数字系统对数字系统的干扰	(130)
2.5.3	数字系统对模拟系统的干扰	(131)
2.5.4	A.I. 及 R.I. 方程及其推广应用	(133)
2.6	可靠性、可用性分析	(138)
2.6.1	概念与定义	(138)
2.6.2	可靠性、可用性估计	(139)
第三章	信号设计与信号检测.....	(141)
3.1	基本理论问题——评价标准及性能极限	(141)
3.2	从频域、时域响应观点出发的信号设计	(146)
3.2.1	按 Nyquist 准则进行信号设计	(146)
3.2.2	最佳波形设计	(150)
3.3	从频域有效利用及抵抗非线性失真观点出 发的信号设计	(155)