

数字通信系统中的 网络优化技术

李添兵 吴海英 冯钢 编著

清华大学出版社

数字通信系统中的网络优化技术

李乐民 吴诗其 冯钢 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

数字通信系统中的网络优化技术／李乐民等编著．—北京：
国防工业出版社，1996.6

ISBN 7-118-01539-3

I. 数… II. 李… III. 数字通讯系统—通信网—最佳化—
技术 IV. TN913.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17866 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{1}{8}$ 344 千字

1996 年 6 月第 1 版 1996 年 6 月北京第 1 次印刷

印数：1—4000 册 定价：19.40 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允

曾 铎

秘 书 长 刘琯德

委 员 尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序) 刘 仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万忱 柯有安

侯 迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

前 言

经过数字通信系统传输的信号序列,通常会受到下述两种干扰而可能出现差错:一种干扰来自于信道噪声;另一种是由于系统传输特性不理想而引起的符号间干扰。如果通信系统(包括发送和接收端所有网络和信道)具有某种最佳的传输特性,在接收端的判决器之前将形成无符号间干扰的信号序列,或者已使符号间干扰最小化。若系统传输特性在发送和接收端有最佳的分配,可最大限度地抑制噪声的影响,使差错概率最小。可见,在数字通信系统中,网络的设计是十分重要的。在实际的数字通信系统中,所需信号的形成往往主要由一个形成滤波器(通常放在发端),或者两个形成滤波器(发、收端各一个)来完成,而系统内其他网络带宽较宽,其影响可忽略不计。本书将系统地阐述用于数字通信系统的网络,主要是各类形成滤波器和信道群延时均衡器的理论和计算机优化设计方法,以及网络特性对通信系统性能的影响问题。本书还将给出数字通信系统中不同用途和各种类型网络的工程设计数据、图表,其中大部分数据、图表是编著者多年来相关科研成果的积累。

本书共分为八章。第一章绪论,介绍数字信号传输对系统特性的要求和常用的设计方法。第二章最优化设计方法简介,介绍优化设计基础和常用的优化设计方法。第三章形成滤波器优化设计,讨论各类形成滤波器的频域和时域优化设计方法。第四章形成滤波器设计数据与图表,给出了大量的有价值的形成滤波器设计数据。第五章特殊用途的形成滤波器设计,分别介绍非线性信道的、用于超 Nyquist 速率传输的、多目标的,以及图文电视系统等形成滤波器的设计。第六章形成滤波器的无源和有源实现,讨

论根据最优的零、极点实现无源和有源的滤波器电路问题。第七章数字式及半数字式波形形成滤波,讨论数字式形成滤波器,如FIR、IIR和只读存储器(ROM)的形成滤波器,以及半数字横向滤波器的设计和实现问题。第八章群延时均衡器的优化设计,介绍用于信道群延时均衡的最优化设计方法及软件。

本书由李乐民主编,吴诗其负责统稿,并编写第五章和第六章。第一、三、四和第七章由冯钢编写。胡剑浩和吴晓文分别编写了第二章和第八章。此外,于德泳、戴柏林和王继业等在研究生学习期间做了出色的工作,本书的部分数据、图表来自于他们的硕士论文。

限于作者水平,书中定有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

内 容 简 介

本书系统地阐述用于数字通信系统的网络,主要是各类形成滤波器和信道群延时均衡器的理论和优化设计方法,以及网络特性对通信系统性能的影响问题。

本书共分八章。第一章介绍数字信号传输对系统特性的要求;第二章介绍优化设计基础和常用的优化设计方法;第三章讨论各类形成滤波器的优化设计方法;第四章给出了大量有价值的设计数据与图表;第五章介绍各种特殊用途的形成滤波器;第六章讨论由零、极点实现电路的方法;第七章介绍数字式的 FIR、IIR 以及用 ROM 实现形成滤波器理论、设计和实现方法;第八章为信道群延时均衡器的优化设计。

本书叙述深入浅出,理论联系实际,书中讨论的形成滤波器均以计算机优化为基础,并紧密联系工程实际应用。本书可供从事数字通信系统和电路的设计人员及从事数字信号处理的技术人员阅读,也可作为理工科大学有关专业的研究生和高年级本科生的教学参考书。

ISBN 7-118-01539-3/TN·252

定价:19.40 元

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 数字信号传输对信道特性的要求	(2)
1.2 形成滤波网络设计方法简介	(29)
第二章 最优化设计方法简介	(37)
2.1 概述	(37)
2.2 经典最优化方法	(41)
2.3 求解线性规划问题的主要方法——单纯形法	(50)
2.4 直接法求解一维非线性最优化问题	(54)
2.5 梯度法	(75)
2.6 用直接法求解多维非线性最优化问题	(88)
2.7 平方和形式的函数极小问题	(100)
第三章 形成滤波器优化设计	(105)
3.1 形成滤波器特性	(105)
3.2 形成滤波器频域设计法	(109)
3.3 形成滤波器设计的时域解析法	(131)
3.4 形成滤波器的时域优化设计法	(146)
第四章 形成滤波器设计与图表	(164)
4.1 升余弦滚降滤波器设计	(164)
4.2 平方根升余弦滚降滤波器设计	(171)
4.3 最佳全极点滤波器设计数据	(190)
4.4 部分响应系统形成滤波器设计	(194)
第五章 具有特殊用途的形成滤波器设计	(226)
5.1 引言	(226)
5.2 用于非线性信道的形成滤波器设计	(226)
5.3 用于超 Nyquist 速率传输的形成滤波器设计问题	(234)
5.4 图文电视系统的形成滤波器设计	(243)

5.5	使系统差错概率最小化的可实现升余弦滚降形成滤波器·····	(252)
5.6	多目标形成滤波器设计·····	(263)
5.7	可实现的矩形波的形成滤波器设计图表数据·····	(271)
第六章	形成滤波器的无源和有源实现·····	(276)
6.1	无源网络的基本知识·····	(276)
6.2	滤波器(幅度网络)的无源实现·····	(279)
6.3	滤波器(幅度网络)的有源实现·····	(286)
6.4	群延时均衡器的实现·····	(289)
6.5	形成滤波器电路计算实例·····	(297)
第七章	数字式及半数字式波形形成滤波·····	(303)
7.1	引言·····	(303)
7.2	FIR 型形成滤波器设计·····	(307)
7.3	IIR 型数字式形成滤波器·····	(324)
7.4	二进制横向滤波器波形形成·····	(341)
7.5	只读存储器(ROM)结构形成滤波器设计·····	(357)
7.6	非线性开关滤波器设计·····	(373)
第八章	群延时均衡器的优化设计·····	(384)
8.1	群延时均衡器的优化设计·····	(384)
8.2	延迟线的优化设计·····	(394)
8.3	滤波器群延时特性的均衡·····	(401)
参考文献	·····	(406)

第一章 绪 论

数字通信是用数字信号形式进行通信的一种通信方式。无论传输的是数字化后的语音、图象等信号,还是计算机、电报等数据信号,在数字信号通信过程中,总是希望发生的差错越少越好。而在数字通信系统中占重要地位的传输系统,对信号的正确传输影响最大。本书所涉及的网络优化设计技术,正是用于设计使数字信号能正确传输的信道传输特性。

在数字传输系统中,无论是基带传输还是调制后的带通传输,其传输性能在很大程度上取决于接收端判决前的信号波形,而此信号波形又由传输信道特性所确定,因此,接收端判决前的信号波形与发射机、信道和接收机判决器之前的所有滤波网络有关,因而传输信道特性的设计应考虑到所有滤波网络的特性。

在实际的通信传输系统中,对传输信号波形的形成(或对应的信号频谱的形成)往往主要由一个(通常在发端)或两个(置于收、发两端,例如完成匹配滤波)滤波器承担,而传输信道中其他滤波网络只完成滤除噪声或邻道信号的功能,对信号波形的影响可以忽略,或者可以将它们的影响作为“预校正”特性综合考虑到形成滤波器特性中,一并进行设计。

本书研究数字传输系统中网络优化设计技术,正是考虑到以上原因,重点研究信号波形或频谱的形成问题。经过优化设计的传输信号波形,可以得到更好的传输性能,因此,本书的研究内容对于传输系统设计有重要意义。

在本章中,主要介绍数字传输系统的一些概念及特点,数字信号传输对信道特性的要求,并从总体上阐述数字传输系统中信号形成(或频谱形成)滤波网络的设计方法与作用。并讨论系统的数

学描述方法和基本公式,定义有关的重要参数,为以后各章的分析和形成滤波器设计奠定基础。

1.1 数字信号传输对信道特性的要求

1.1.1 数字信号的传输

在时间与幅度上都离散的信号,称为数字信号。正因为其离散性,数字信号传输时在中继站可以再生,避免畸变和噪声干扰的积累,因而,它比在时间与幅度上均连续的模拟信号有更好的抗干扰性能。另外,数字通信还具有便于处理加密、易于交换及设备易集成化等优点,因此,数字通信在近几十年来得到迅猛发展。

数字通信中,用脉冲代码来表示要传送的信息,此脉冲序列可记为 $\{a_k\}$, $k=\cdots-2,-1,0,1,2,\cdots$, a_k 称为码元或符号。在二元制中, a_k 可取0和1(或-1和+1);在M元制中, a_k 可取0,1,2, $\cdots$, $(M-1)$ 。在实际传输中,用电脉冲来表示代码,有各种形式的电脉冲。在一个码元时间 T_s 内,电位维持不变,且用高电位代表“1”码,低电位代表“0”码,称为单极性不归零码(NRZ码);若在一个码元时间 T_s 内,高电位只维持一段时间就变为低电位,则称为归零码(RZ码)。

常用的NRZ码和RZ码所占频带很宽。例如,发送“0”、“1”独立、等概率双极性归零码的双边功率谱可求得为

$$W(f) = A^2 f_s \tau^2 \left(\frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau} \right)^2 \quad (1-1)$$

式中 τ 为码宽; $f_s=1/T_s$ 为数码速率; A 为脉冲幅度。当上式中 $\tau=T_s$ 时,则得双极性不归零码功率谱为

$$W(f) = A^2 T_s \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 \quad (1-2)$$

从式(1-1)和式(1-2)可以看出,矩形随机码的功率谱是从零频率开始,一直到很高的频率。要无畸变地传送这种波形,需要频

带很宽的信道。实际上,若传输的信道频带带宽远大于传输数码率,可近似为无带宽限制,传输波形近似为矩形。另一情况是传输信道带宽有限制。通常,为了频带的有效利用,常用低通滤波器来有意地限制传输频带。这样,矩形随机码经过低通滤波后,信号的功率谱仍是从近于零频率开始,一直到一定高的频率。称这种高限频率与低通频率之比远大于 1 的信号为基带信号。基带信号可以不经过进一步频谱处理而直接传输,称为基带传输。

图 1-1 示出了一个基带传输系统的基本原理方框图。实际系统中还有放大器及信道衰减器等,由于只是将信号幅度乘以一个系数,在原理图上没有表示出来。

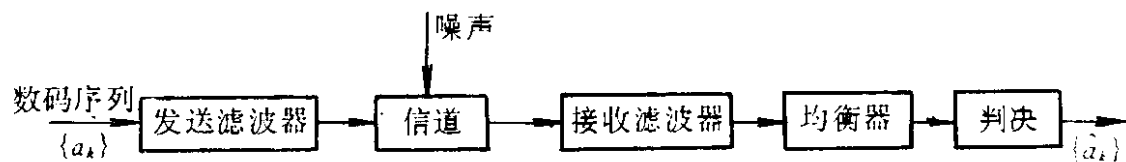


图 1-1 基带数字传输系统方框图

发送滤波器的作用是限制信号频带。如果信道的较高频带部分还要传送其他信息,则这个滤波器是必需的。否则,发送滤波器也可省去。接收滤波器的作用是滤出带外噪声与干扰。

对于带通型信道,例如无线信道,不能直接传送基带信号。可以采用调制方法,将基带信号搬移到合适的频带再传送,在收端经解调恢复基带信号,如图 1-2 所示。图 1-2 可以看作为图 1-1 的信道。

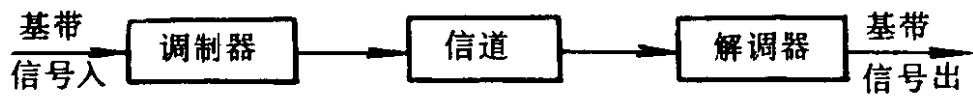


图 1-2 调制与解调示意图

基带传输系统的研究是有重要意义的。这是因为,第一,即使在带通传输制里,也同样存在基带传输问题;第二,在理论上也可证明,任何一个采用线性调制的带通传输系统总是可以由一个等效的基带传输系统所替代。故在带通系统中存在的频谱形成或信

号波形形成问题也可以等效到基带来研究。

1.1.2 基带数字信号在信道传输中的特点

一般说来,传输媒介带宽不可能无限宽,其他影响传输的特性也不可能是完全理想的。因此,基带脉冲在传输过程中必然要受到传输媒介的幅度频率特性和相位频率特性的影响,使传输波形产生失真,这种失真主要反映在以下几方面:

(1)接收到的脉冲幅度变小,这是由于传输线路存在着衰耗造成的。

(2)脉冲宽度增加,这是由于传输线路的频带有限,使波形产生失真而造成的。波形失真最严重的后果是形成波形拖尾,可能造成符号间干扰(或称码间干扰)。

(3)波峰延后,这反映了传输线路的延迟特性。

这些失真可用图 1-3 表示。

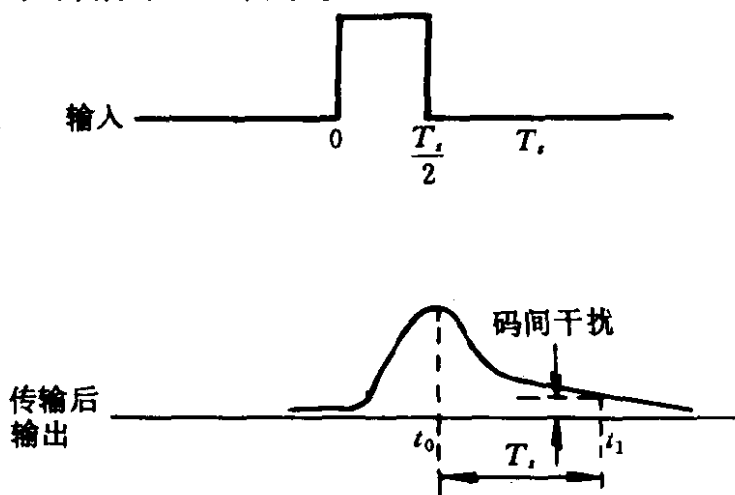


图 1-3 传输波形失真

在接收端如果将收到的失真波形进行判决再生,就会出现为题。图 1-3 中,在 t_1 时刻判决时, t_0 时刻信息码传输失真后波形幅度并未趋于零。如果拖尾现象严重,加上线路噪声的干扰,在 t_1 时刻就会出现误判而造成误码,这种因波形拖尾造成对判决的干扰,称为符号间干扰。

为减少误码,可采用以下方法:

(1)加大传输信号电平幅度,相对噪声幅度变小,相当于提高

信噪比,这需要加大发射机功率;

(2)依据传输信道幅度、相位的频率特性,对发送信号波形进行加工,使在接收端得到无符号间干扰的判决点波形。这可通过波形形成滤波和信道特性均衡来达到。

1.1.3 无符号间干扰的基带传输特性

现将图 1-1 的基带传输系统简化为图 1-4 所示的框图。图中 $H(\omega)$ 代表整个基带传输系统的频率特性。下面考虑 $H(\omega)$ 应具有什么样特性时,在识别点(即抽样判决点)的波形才无符号间干扰。

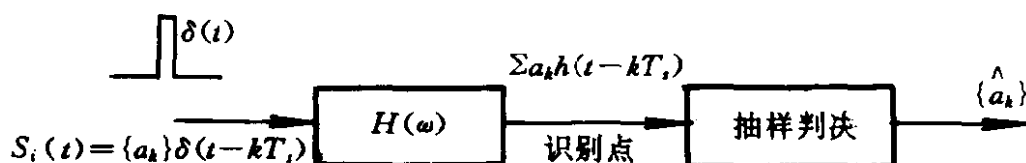


图 1-4 简化基带数字传输系统框图

根据传输理论,一定的波形是可以用冲击脉冲 $\delta(t)$ 激励有一定脉冲响应(或传递函数)的网络来实现的。因此,要研究无失真的基带传输特性,首先就要研究波形和传输网络(广义的网络,这里指的是从发到收的整个系统)间的关系,从理论上阐明如何配合才能有效而可靠地传输数字信号。

一、理想低通滤波器的波形形成——(Nyquist)第一定理

现提出的问题是能否设计或综合一个传输网络,当某种形式脉冲(通常为单位矩形脉冲)输入到这一网络后,在网络的输出端可得到所要求的波形。利用这种波形的信号来传输数字信息既可满足可靠性的要求,又能达到足够高的频带利用有效性。在数字通信传输系统中,把此过程称为波形形成,称这个网络为形成网络或形成滤波器。此网络的设计首先在于寻找适合要求的传递函数。

如图 1-4 所示的简化基带传输系统框图,这里假设自发送机至取样判决器以前的其他部件的特性不影响波形的形成,或者说它们在信号频带内的传递函数符合无失真传输条件,则信号波形的形成全由形成滤波器 $H(\omega)$ 决定。这并不影响研究问题的实质。另外需要说明的是,信道(这里指除形成网络以外其他传输媒介的特性)频带内的传递函数不符合无失真传输条件时,可采用均衡手段加以校正。特别是进入交换网的数字通信,常需在不同信道上传输,所以在设计形成滤波器时,把校正信道弥散现象的任务独立出来,由信道均衡手段去加以解决。这样,信道和信道均衡器合并以后的总特性可以假定为符合无失真传输条件。

设形成滤波器的输入信号为

$$s_i(t) = \sum_k a_k \delta(t - kT_s) \quad (1-3)$$

式中, a_k 为数码值; T_s 为输入码元间隔,它为符号速率(波特数)的倒数。

设形成滤波器的传递函数为 $H(\omega)$,其冲激响应是 $h(t)$,则

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1-4)$$

则形成滤波器输出信号为

$$s_0(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s) \quad (1-5)$$

按照传输需要使信号和传输网络最好地配合,以达到以下三个目的:

- (1)在有效频带范围内,要求传输速率足够高;
- (2)在所要求的传输速率下,使误码率 P_e 足够低,即可靠性足够高;
- (3)形成滤波网络是物理可实现的。

现在的问题是什么样的 $H(\omega)$ 能够形成最小符号间干扰,而更希望能做到无符号间干扰。因而,求出无符号间干扰时的 $H(\omega)$ 将具有十分重要的意义。

理想低通滤波器是最简单的一种形成滤波器,它可以形成所