

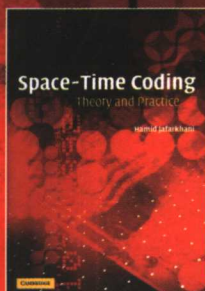
 国外名校最新教材精选

空时编码的理论与实践

Space-Time Coding: Theory and Practice

〔美〕 哈米德·贾法哈尼 著
任品毅 译

HAMID JAFARKHANI



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

 国外名校最新教材精选

Space-Time Coding: Theory and Practice

空时编码的理论与实践

〔美〕 哈米德·贾法哈尼 著

HAMID JAFARKHANI

Associate Professor

Department of Electrical Engineering and Computer Science
University of California, Irvine

任品毅 译



西安交通大学出版社

Xi'an Jiaotong University Press

内容简介

本书从多输入多输出(MIMO)信道出发,给出了其完整的数学模型,简明清晰地介绍了空时设计中在简单的译码复杂度、最优化系统性能和最大化信息速率这三个相互矛盾的目标之间寻求折衷的原理和方法,给人以耳目一新的感觉。全书回避了空时无线信号处理以及编码算法中最深奥的数学运算,更多地运用了简单的类比方法,同时提供了大量的图表,为发射分集以及空时分组码提供了简单、内在的概念和解释。

本书可作为从事空时编码技术的科研人员和工程技术人员的参考书。同时因全书内容的表述符合教学法,在每章的末尾还配有难度适中、指导性较强的习题,因此可作为研究生的教材使用。

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

Space-Time Coding: Theory and Practice

© Cambridge University Press 2005

This book is in Copyright. Subject to statutory exception and to the provisions of relevant collective licensing agreements, no reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press.

本书中文简体字翻译版由剑桥大学出版社授权西安交通大学出版社独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

陕西省版权局著作权合同登记号: 25-2006-003 号

图书在版编目(CIP)数据

空时编码的理论与实践/(美)贾法哈尼著;任品毅译.

—西安:西安交通大学出版社,2007.7

(国外名校最新教材精选)

书名原文:Space-Time Coding: Theory and Practice

ISBN 978-7-5605-2501-3

I. 空... II. ①贾... ②任... III. 无线电通信-编码-教材 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 103382 号

书 名:空时编码的理论与实践

著 者:[美]哈米德·贾法哈尼

译 者:任品毅

出版发行:西安交通大学出版社

地 址:西安市兴庆南路 10 号交大出版大厦(邮编:710048)

电 话:(029)82668357 82667874(发行部)

(029)82668315 82669096(总编办)

电子邮件:xjtupress @ 163.com

印 刷:西安交通大学印刷厂

字 数:342 千字

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:17.25

印 次:2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数:0 001~3 000

书 号:ISBN 978-7-5605-2501-3/TN·98

定 价:32.00 元

版权所有 侵权必究

译者序

新一代无线通信系统将向高传输速率和高移动性发展,如后三代(B3G, Beyond 3 Generation)或第四代(4G, 4 Generation)移动通信系统,可以提供的数据传输速率高达 100 Mbit/s,甚至更高,支持的业务从语音到多媒体业务,包括实时的流媒体业务,同时也应满足移动速度高达 250km/h 的高速移动环境下的可靠传输。这样在有限的频谱资源上,如何高效地加以利用,增加信道容量,并保证信息可靠地传输已迫在眉睫。在此情况下,利用多天线实现时空传输,已成为继频分、时分乃至码分传输手段之后,增加信道容量的最后手段。空时分组码是通过利用多天线发射来提高系统分集增益,或者说通过对发射端的发射符号进行设计,从而达到各天线之间的相互保护的目,降低同一符号在所有天线上发生深度衰落的机会,进而提高系统性能。

本书从 MIMO 信道入手,给出了其完整的数学模型,简明、清晰地揭示了我們进行空时设计的目标——即在简单的译码复杂度、最优化系统性能和最大化信息速率这样三个相互矛盾的目标之间寻求折衷,给人以耳目一新的感觉。全书抛开了所有空时无线信号处理以及编码算法中最深奥的数学运算,更多地运用了简单的类比方法,同时提供了大量的图表,为发射分集以及空时分组码提供了简单、内在的概念和解释。

本书是为一年级的研究生以及希望能从中完成对该项技术学习的工程师们编写的。由于内容的表述符合教学法,同时在每章的末尾都配有难度适中、指导性较强的习题,因此适合作为研究生课程的教材。

全书由任品毅翻译及整理,其中李锋参与了第 9 章和第 10 章的工作,荣玫参与了第 11 章的工作。在翻译的过程中,得到了本书的责任编辑赵丽萍老师的大力协助,没有她的帮助,本书将难以完成,在此表示衷心的感谢。最后,但绝不是最少的,感谢我的妻子张红艳女士在对本书的翻译和整理期间,对我生活中的照顾。由于本书内容的新颖性和译者不可避免存在的主观片面性,书中不妥和错误之处在所难免,殷切地希望广大读者及同行专家批评指正。

前言

在未来,大多数无线通信系统中应用多天线技术似乎已成为必然。今天,最主要的问题就是如何应用多天线技术以及在某些特殊应用场合什么方法最为合适。在过去的几年里,学术界对空时编码和多输入多输出(MIMO)系统的兴趣大增。近年来,工业界也同样表示了极大的兴趣。该课题从理论探索到业界的每一位工程师实践居然发展得如此迅速,不得不令人拍案惊奇。仅仅还在几年以前,当我在 AT&T 实验室开始这项研究工作的時候,很多人都提出了这样的问题“在一个实际系统中,谁会使用一根以上的天线呢?”然而时至今日,关于这样的怀疑已荡然无存。

人们对空时编码的兴趣及活动的迅猛增长导致了大量的研究人员加入到该领域中来,他们中间包括了从仅对空时编码背后的数学理论感兴趣的数学家到试图构造这样的系统的工程师。其需求在深度上不仅包括了空时编码的理论,而且还包括了空时编码的事件,本书希望能够满足这些需求。本书是作为一年级研究生的教材以及希望能从中完成对该项技术学习的工程师们的参考书而编写的。本书的一个较早的版本已经被加州大学 Irvine 分校作为空时编码课程的教材而使用。开设这样一门课程的目的就是对那些具备一些数字通信基础知识的人传授空时编码的思想。在大多数情形下,我们都是从单输入单输出(SISO)信道开始,然后扩展到 MIMO 信道。因此,学生们或工程师们应当能够学习到所有的概念。学生们可能会对定理和引理的细节以及证明更感兴趣一些,而工程师们则会跳过这些证明,在不牺牲对问题阐述的连续性的前提下着重关注其结果。

一个关于空时编码的典型教程可以从如第 1 和第 2 章中包含的无线通信以及 MIMO 信道容量等背景材料开始。第 3 章中包括了对空时编码的设计准则的回顾。第 4 章和第 5 章提供了空时分组码背后理论的细节描述。实践家若仅对码字的结构感兴趣,可以跳过这些章节中的所有证明而只关注其中的例子。第 6 章和第 7 章深入地讨论了空时格码。每一章中都包含了对码字的性能分析和仿真结果。对那些对该领域的实践更感兴趣的研究人员而言,仿真结果已经很充分,可以迅速跳过那些关于性能分析的章节。实践者们可以继续研究第 11 章中关于对 MIMO-OFDM 的讨论以及第 9 章中接收机的设计的内容。另一方面,那些对空时编码理论更感兴趣的研究人员,则可以继续研究第 8 章中差分空时调制方面的内容。最后,为

了使内容更加完整,我们在第 9 和第 10 章中讨论了 BLAST 系统以及其它空时处理方法。在每章中我们都给出了相应的作业思考题。

本书包含了许多研究人员的贡献。我非常感谢他们在空时编码领域所作的贡献。我特别感谢我的好友和前同事,Vahid Tarokh 教授,是他将我带入了空时编码领域。同时,我也感谢我在 AT&T 实验室的其他同事,是他们激发了我对空时编码的大多数基本概念和思想。没有我在 AT&T 实验室的部门领导 Behzad Shahraray 博士的支持,我将在该领域毫无建树,我非常感谢他为我提供了相应的机会。同时,Rob Calderbank 教授也是我的工作的一大支持者。

本书的上一版本已经由我的学生和其他人进行了评阅。他们的评语和建议使得这一版本的质量得以提高。特别是,John Proakis 教授,Syed Jafar 教授,Masoud Olfat 博士和 Hooman Honary 的建议使得本书已有很大的改进。我的博士研究生 Li Liu,Javad Kazemitabar 和 Yun Zhu 帮我校对了几章。本书中,很多给出的仿真结果就是由 Yun Zhu 进行了双重的验证。我还对国家科学基金委表示感谢,是他们给了我一个国家基金委的事业奖以表示对我关于本书的相关研究和教育目标的支持。

最后但却是最不能少的是,我对我的妻子 Paniz 无私的爱和支持表示感谢。

标准符号

$\ \cdot \ $	欧几里得范数
$\ \cdot \ _F$	弗罗贝尼乌斯(Frobenius)范数
$\otimes$	张量积
$*$	共轭
$+$	摩尔-彭罗斯(Moore - Penrose)广义逆(伪逆)
$\det$	矩阵的行列式
E	数学期望
$f_X(x)$	x 的概率密度函数
H	厄米特
Im	虚部
I	虚部
I_N	$N \times N$ 单位阵
j	$\sqrt{-1}$
K_X	矢量 X 的协方差
Re	实部
R	实部
T	转置
Tr	矩阵的迹
Var	方差

空时编码符号

$\alpha_{n,m}$	发射天线 n 至接收天线 m 之间的路径增益
χ_k	具有 $2k$ 个自由度的 χ 分布
η	噪声
ϕ	星座图的旋转参数
γ	信噪比
$\rho(N)$	Radon 函数
θ	空时分组码的旋转参数
b	每信道发射的比特数
C	容量
C_{out}	预留容量
$\mathcal{C}$	复数集合
$\mathbf{C}$	$T \times N$ 维的发射码字
$\mathcal{C}$	强正交码字的集合
$d_{\min}$	最小距离
E_s	发射符号的平均能量
f_d	多普勒频移
G_c	编码增益
G_d	分集增益
$\mathbf{G}$	空时格码的生成矩阵
$\mathcal{G}$	空时分组码的生成矩阵
$\mathbf{H}$	$N \times M$ 信道矩阵
I	格中的状态数
J	频率选择性衰落信道的单位脉冲响应中的 delta 函数的个数
J	结合空间复用技术和空时编码技术的系统中的群的个数
2^i	格的每个状态的分支的个数
K	每个分组中发送的符号个数
L	SOSTTC 中正交(数据)分组的个数
L	OFDM 中一个 IFFT 和 FFT 分组的大小
L -PSK	一个包含 $L=2^s$ 个符号的 PSK 星座图
M	接收天线数
N	发射天线数
$\mathcal{N}$	$T \times M$ 噪声矩阵
N_0	在每一个维度上方差均为 $N_0/2$ 的复噪声样本
P	格中转移路线的个数(P 个转移中两个不同的路径)
P_{out}	中断概率
Q	格的记忆数

$\mathbf{r}$	$T \times M$ 接收矩阵
r	以 bit/(s·Hz) 为单位的传输速率
r	接收的信号
R	空时编码(STC)的码率
$\mathbb{R}$	实数集合
s	发射信号
S_t	时刻 t 编码器的状态
x	未知变量
$\mathbb{Z}$	整数集合

缩略语

ADC	模拟到数字的转换
AGC	自动增益控制
AWGN	加性高斯白噪声
BER	误比特率
BLAST	贝尔实验室分层空时
BPSK	二元相移键控
BSC	二元对称信道
CCDF	补累积分部函数
CDF	累积分部函数
CDMA	码分多址
CSI	信道状态信息
CT	无绳电话
DAST	对角代数空时
DASTBC	对角代数空时分组码
D-BLAST	贝尔实验室对角分层空时
DECT	数字无绳电话
DFE	判决反馈均衡
DPSK	差分相移键控
EDGE	增强型数据的全球演化
FER	误帧率
FFT	快速傅里叶变换
FIR	有限脉冲响应
GSM	全球移动通信系统
IFFT	快速反傅里叶变换
iid	独立同分布
IMT	国际移动电话
ISI	码间串扰
LAN	局域网
LDSTBC	线性色散空时分组码
LOS	视线传播
MGF	矩生成函数
MIMO	多输入多数出
MISO	多输入单输出
MMAC	多媒体移动接入通信
MMSE	最小均方误差
MRC	最大比合并

ML	最大似然
MTCM	多格编码调制
OFDM	正交频分复用
OSTBC	正交空时分组码
PAM	脉冲幅度调制
PAN	个域网
PAPR	峰均功率比
PDA	个人数字助理
PDC	个人数字蜂窝通信
pdf	概率密度函数
PEP	成对错误概率
PHS	个人手持电话系统
PSK	相移键控
QAM	正交幅度调制
QOSTBC	准正交空时分组码
QPSK	正交相移键控
RF	射频
RLST	随机分层空时
RV	随机变量
SER	误符号率
SISO	单输入单输出
SIMO	单输入多输出
SM	空间复用
SNR	信噪比
SOSTTC	超正交空时格码
SQOSTTC	超准正交空时格码
STBC	空时分组码
STTC	空时格码
TAST	线状代数空时
TASTBC	线状代数空时分组码
TCM	格型编码调制
TDD	时分复用
TDMA	时分多址
V-BLAST	贝尔实验室垂直分层空时
ZF	迫零

目 录

译者序

前言

标准符号

空时编码符号

缩略语

第 1 章 引言	(1)
1.1 本书的介绍	(1)
1.2 无线应用	(2)
1.3 无线信道	(4)
1.4 衰落信道的统计模型.....	(10)
1.5 分集.....	(12)
1.6 空间复用增益及其与分集之间的折衷.....	(18)
1.7 闭环与开环系统.....	(20)
1.8 发射分集的历史回顾.....	(21)
1.9 小结.....	(21)
1.10 习题	(22)
第 2 章 多输入多输出信道的容量	(24)
2.1 多输入多输出信道的传输模型.....	(24)
2.2 多输入多输出信道的容量.....	(27)
2.3 预留容量.....	(32)
2.4 要点小结.....	(35)
2.5 习题.....	(36)
第 3 章 空时编码设计准则	(37)
3.1 背景.....	(37)
3.2 秩和行列式准则.....	(38)
3.3 迹准则.....	(41)
3.4 最大互信息准则.....	(43)
3.5 要点小结.....	(43)
3.6 习题.....	(44)

第 4 章 正交空时分组码	(45)
4.1 引言	(45)
4.2 Alamouti 码	(45)
4.3 最大似然译码和最大比合并	(48)
4.4 实正交设计	(49)
4.5 广义实正交设计	(59)
4.6 复正交设计	(65)
4.7 广义复正交设计	(66)
4.8 伪正交空时分组码	(79)
4.9 性能分析	(81)
4.10 仿真结果	(88)
4.11 要点小结	(94)
4.12 习题	(95)
第 5 章 准正交空时分组码	(97)
5.1 成对译码	(97)
5.2 旋转准正交空时分组码	(99)
5.3 最优旋转和性能的准正交空时分组码	(101)
5.4 准正交空时分组码的其它例子	(106)
5.5 发射天线数大于 4 时的准正交空时分组码	(108)
5.6 要点小结	(110)
5.7 习题	(111)
第 6 章 空时格码	(112)
6.1 引言	(112)
6.2 空时格型编码	(115)
6.3 改进型空时格码	(119)
6.4 空时格码的性能	(126)
6.5 仿真结果	(128)
6.6 要点小结	(132)
6.7 习题	(132)
第 7 章 超正交空时格码	(134)
7.1 动机	(134)
7.2 超正交码	(136)
7.3 CGD 分析	(147)
7.4 编码和译码	(152)
7.5 性能分析	(157)
7.6 扩展到发射天线数大于 2 的系统	(159)
7.7 仿真结果	(165)
7.8 要点小结	(169)

7.9 习题	(170)
第 8 章 差分空时调制	(172)
8.1 引言	(172)
8.2 差分编码	(175)
8.3 差分解码	(179)
8.4 扩展到发射天线数大于 2 的系统	(182)
8.5 仿真结果	(188)
8.6 要点小结	(191)
8.7 习题	(192)
第 9 章 空间复用和接收机的设计	(194)
9.1 引言	(194)
9.2 空间复用系统	(195)
9.3 球形译码	(195)
9.4 接收机设计中应用均衡技术	(199)
9.5 V-BLAST	(201)
9.6 D-BLAST 结构	(205)
9.7 Turbo-BLAST 结构	(207)
9.8 结合空间复用和空时编码	(209)
9.9 仿真结果	(214)
9.10 要点小结	(216)
9.11 习题	(216)
第 10 章 非正交空时分组码	(218)
10.1 引言	(218)
10.2 线性色散空时分组码	(218)
10.3 采用数论的空时分组码	(224)
10.4 线状代数空时分组码	(226)
10.5 仿真结果	(231)
10.6 要点小结	(233)
10.7 习题	(234)
第 11 章 关于空时编码的附加主题	(236)
11.1 MIMO-OFDM	(236)
11.2 MIMO-OFDM 的实现问题	(241)
11.3 空时 turbo 码	(244)
11.4 波束成形和空时编码	(246)
11.5 习题	(250)
参考文献	(251)

第1章

引言

1.1 本书的介绍

无线通信系统近年来的发展使得无线信道和网络的吞吐量得以增大。与此同时,无线通信的可靠性也得以提高。其结果就是用户使用无线系统的频度增加。无线通信得以迅猛发展背后的驱动力就是其易于携带、移动和接入。尽管有线通信给予了更强的稳定性、更好的性能以及更高的可靠性,但是它也将系统限制于某一固定位置或界定于某一环境中。逻辑上,人们更倾向于选择自由而不是限制。因此,人们很自然地倾向于尽可能地除去有线的束缚。用户甚至于准备付出一定的合理代价来换取这一折衷。这样的代价既可能是降低的质量,也可能是由于断线造成的更高的风险,或者是较小的吞吐量,但只要整体的性能高于可承受的门槛即可。无线通信系统的主要问题就是在更为可靠和尽量透明的前提下将有线通信系统转变为无线通信系统。尽管对用户而言,自由度是其主要驱动力,然而对该领域的研究人员而言,却是为了实现这一目标而面临的无穷无尽的挑战。我们研究不同的无线通信系统以及这些应用中无线信道的行为,我们也研究这些无线通信系统所面临的挑战。

贯穿全书,我们给出了应用多天线的无线通信系统中一些挑战的解决方案。本书的主要话题就是在无线通信系统中,如何利用多天线来克服这些困难。我们的研究始于利用多天线来提高系统的容量。然后,我们给大家展示如何设一个基于多天线的空时结构,它能够在保持发射功率不变的前提下,提高了系统的性能。本书的大部分章节都在讨论不同的空时编码方法的细节。每一种方法的讨论细节包括设计、性质、编码、译码、性能分析以及仿真结果。我们对每一方法的编码和译码的复杂度以及在吞吐量、复杂度和性能之间的折衷进行了详细地分析。我们全部的目标就是保持在空时编码理论和实践之间的平衡。

1.2 无线应用

有很多应用了无线通信技术的系统,无线电广播可能是最早的一个成功应用之一,电视和卫星通信也是非常重要的应用。然而,近年无线通信的研究热点可能主要受 20 世纪 80 年代初期建立的第一代蜂窝电话系统的影响。第一代移动通信系统采用模拟传输方式,90 年代发展起来的第二代蜂窝通信系统采用数字传输方式,这两套系统都是被设计为主要用来传送话音。蜂窝移动通信系统的成功以及它们在公众面前的良好表现,导致无线通信在工业界和学术界受到日益关注。许多研究者集中于提高无线通信系统的性能,并将之应用扩展到其它种类的信源,诸如图像、视频以及数据等。

与此同时,工业界也积极地参与建立新的标准。其结果就是产生了很多新的应用,同时老的应用的性能也得以增强。个人数字蜂窝(PDC),全球移动通信系统(GSM),IS-54 和 IS-136 都是这些标准的一些早期的例子。尽管它们所能支持的数据业务可达到 9.6 kbit/s,但这些系统都是基于语音通信来设计的。能支持 100 kbit/s 数据传输速率的更先进的业务已经从这些标准中演化出来,并且被称作第 2.5 代。近年来,第三代移动通信系统被设计为承载高速率的业务。随着多媒体业务传输的渐入人心,第三代移动通信系统瞄着高速移动用户 144~384 kbit/s 和低速移动用户 2.048 Mbit/s 的目标发展。

第三代移动通信标准的主体就是众所周知的国际移动电话(IMT-2000)。它包括了全球演化的增强型数据(EDGE)标准,这是一个时分多址(TDMA)系统,并且是 GSM 的增强系统。它还包括了两个基于宽带码分多址(CDMA)的系统。其中,一个是被称之为 CDMA2000 的同步系统,另外一个是被称之为 WCDMA 的异步系统。除了可满足更高的比特速率的应用以外,第三代移动通信的标准还支持同时承载多个速率不同的业务。这意味着不仅需要提高频谱效率,同时还要增强配置新业务的灵活性。为达到这些目标,我们将面临很多的挑战和机遇。

当然,更高比特速率的需求不会止步于第三代无线通信系统的普及。另外一个驱动更高比特速率以及更高频谱效率需求的应用就是无线局域网(LANs)。人们普遍认识到随着移动无线因特网的发展,通过无线连接到网络是未来通信网络和系统的一个不可避免的部分。不言而喻,设计一个具有如此高的频谱效率的系统是一项非常具有挑战性的工作。在该领域最为成功的标准可能就是 IEEE802.11 系列标准。IEEE802.11a 是基于正交频分复用(OFDM)技术并且支持最高可达到 54 Mbit/s 的数据传输速率的标准,它在 5 GHz 这一未授权的频段上传输数据。IEEE802.11b 在 2.45 GHz 这一未授权的频段上提供最高 11 Mbit/s 的数据传输速率。其它的无线局域网标准包括高性能局域网(HiperLAN)和多媒体移动接入通信(MMAC)。高性能局域网和多媒体移动接入通信都是采用正交频分复用技术。这是无线通

信的一个非常重要的应用,它为物理上的连接、便携以及网络用户的灵活性提供了很高的自由度。

无线通信还有很多的其它应用,无绳电话系统以及无线本地环路就是两个重要的例子。无绳电话标准包括个人手持电话系统(PHS),数字无绳电话(DECT),以及无绳电话(CT2)。无线个域网应用于短距离范围的通信。IEEE802.15 就致力于这些标准的工作。蓝牙就是一个如何在相互邻近的设备之间构建一个无线自组织网络的很好的例子。蓝牙的标准就是基于跳频 CDMA 技术,并且在 2.45 GHz 这一未授权的频段上进行数据传输。无线个域网的目标就是连接不同的端口与移动设备,诸如蜂窝电话、无绳电话、个人计算机、个人数字秘书(PDA)、寻呼机以及外围设备等等。无线个域网让这些设备协同地通信与运行,同时无线个域网可以取代不同消费电子设备之间的有线连接,例如键盘、鼠标和计算机之间或者电视机和电缆接线盒之间的连接。

1.2.1 无线带来的挑战

尽管不同的应用具有不同的特点,并且采用不同的技术,但是大多数应用面临着相同的挑战。在不同的应用中,无线通信所面临的各种挑战的重点可能不尽相同。然而,下面所列几乎适用于所有应用,无线通信中的诸多挑战为:

- 高速数据速率的需求;
- 业务质量;
- 移动性;
- 便携;
- 无线网络的连通性;
- 其它用户的干扰;
- 保密性/安全。

有很多需求,诸如高速数据速率的需求以及业务质量并非无线通信所特有的。但是一些挑战,对无线通信系统却是特有的。例如,便携式将导致电池的使用,并且由于电池的续航能力的限制将带来寻找低功耗算法的挑战。这就要求在设计发射机和接收机时要特别注意这一点。因为基站的工作并不需要电池供电,而且不受功率的限制,因此不同终端具有不对称的复杂度将是合乎需要的。

无线通信系统中所面临的挑战的另外一个例子就是无线网络的连接性。接收到的信号功率取决于发射机和接收机之间的距离。因此,确保由于节点的移动,导致发射机和接收机之间的距离增加时,而节点之间是否仍然保持连接非常重要。同时,由于无线信道的快速变化,移动性给无线通信系统带来了许多新的挑战。无线信道中另外一个重要的挑战就是来自于其它的用户或其它电磁波源的干扰。在有线系统中,因通信环境更多地可控,故干扰造成的损害相