

OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide

- 详细介绍了高速率无线通信标准所必需的技术——正交频分复用
- 由位于美国的Nokia研究中心的权威研究人员编著

〔美〕 Juha Heiskala 著
John Terry
杨晓春 何建吾 等译

OFDM无线局域网

SAMS



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide

OFDM 无线局域网

[美] Juha Heiskala 著
John Terry

杨晓春 何建吾 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 提 要

本书主要讲述采用正交频分复用(OFDM)技术的宽带通信技术及其在 WLAN 中的应用,具体内容包括发展背景和 OFDM WLAN 的概况;OFDM 网络中使用的常用同步算法,特别是定时同步算法,包括分组检测、码定时恢复和取样时钟跟踪;OFDM WLAN 中使用的调制和编码技术,包括相移键控、正交幅度调制、分组码和卷积码;在 OFDM 的环境下几种通用的发射和接收分集方案及其对性能的影响;因 RF 非线性所造成的 OFDM 系统的系统失真问题及其相关的补偿措施;IEEE 802.11 网络的 MAC 和 HiperLAN/2 网络的 MAC;以及使用 FPGA 快速实现 WLAN 的原型设计等等。

本书适用于开发 OFDM 无线局域网系统的工程技术人员以及在校的高年级大学生和研究生。

SAMS

Authorized translation from the English language edition, entitled OFDM WIRELESS LANs: A THEORETICAL AND PRACTICAL GUIDE, 1st Edition by HEISKALA, JUHA; TERRY, JOHN, published by Pearson Education, Inc, publishing as Sams, Copyright © 2002 [SAMS].

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc. CHINESE SIMPLIFIED language edition published by BEIJING MEDIA ELECTRONIC INFORMATION CO. LTD, Copyright © [2003].

本书英文版由美国 SAMS 公司出版, SAMS 公司已将中文版独家版权授予中国电子工业出版社及北京美迪亚电子信息有限公司。未经许可,不得以任何形式和手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号: 01-2002-5166

图书在版编目(CIP)数据

OFDM 无线局域网/(美)海斯卡拉(Heiskala, J.)著;杨晓春等译. —北京:电子工业出版社, 2003.3

书名原文: OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide

ISBN 7-5053-8540-2

I. O... II. ①海... ②杨... III. 宽带通信系统—无线电通信—局部网络 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 010237 号

责任编辑: 和敬 春丽

出版发行: 电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

北京市海淀区翠微东里甲 2 号 邮编: 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 14 字数: 350 千字

版 次: 2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 29.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。

联系电话: (010)68279077

作者简介

John Terry 博士,是位于美国得克萨斯州达拉斯的 Nokia 研究中心的一名高级研究人员,他现在在高速接入(HAS)组中负责 OFDM 调制和编码项目。Terry 博士已经发表了多篇会议和期刊论文,进行了多次关于无线通信的演讲,申请了 6 个有关 OFDM 无线 LAN 的专利。他在无线通信方面已经有 12 年的工作经验,曾就职于 NASA 的 Glen 研究中心和得州仪器公司,此外 Terry 博士还是 IEEE 802.11 任务组的副主席,以及 IEEE 在无线通信方面的多个会议和期刊的审稿人。

Joha Heiskala,是位于美国得克萨斯州达拉斯的 Nokia 研究中心的一名高级研究人员,他积极参与 IEEE802.11 的标准化工作,并领导开发了在多个软件平台上的 802.11a 系统仿真,发明或合作发明了 OFDM LAN 方面的三项专利,并与 John Terry 博士一起设计了可获得 100Mb/s 速度的调制和编码方案,这是在 OFDM 无线 LAN 当前已分配的带宽规范下获得的。

技术编辑简介

Douglas Williams 分别于 1984 年、1987 年和 1989 年从位于得克萨斯州休斯顿市的 Rice 大学电子和计算机工程系获得学士、硕士和博士学位。1989 年他参加了位于佐治亚州亚特兰大市的佐治亚工学院电子和计算机学院的教研工作,现在是副教授,同时他还就职于信号和图像处理中心并教授信号处理和电信方面的课程。Williams 博士是 IEEE Transactions on Signal Process 的副编辑,是 IEEE 信号处理协会的信号处理理论和方法技术委员会的成员。他与别人一起编辑了《数字信号处理手册》一书,该书由 CRC 出版社和 IEEE 出版社共同出版。Williams 博士还是 Tau Beta Pi, Eta Kappa Nu 和 Phi Beta Kappa 荣誉协会的会员。

Anthony Reid 以优异成绩从位于纽约的 Rensselaer 理工学院获得学士学位,从位于加州帕洛阿尔托市的斯坦福大学获得硕士学位,在位于得克萨斯州达拉斯市的 Southern Methodist 大学获得博士学位。Reid 博士现在就职于 Nokia 研究中心,是主要的研究科学家,从事第三代移动通信系统中调制、编码和均衡方面的应用研究。他曾经就职于 Nortel,从事第三代无线网络中的网络结构研究。在加入 Nortel 和 Nokia 之前,Reid 曾是 Raytheon Systems 公司系统技术中心的工程师和先进信号处理的部门经理,这个研究组开发了商用和军用的宽带通信系统,在商用领域开发了高速 SATCOM 调制解调器,在过去,该研究组还开发了图像和信号处理算法,以用于近红外和雷达中的自动探测和跟踪。

Max 5/20/

献 辞

献给我美丽可爱的妻子 Sonya Terry, 我的儿子 Amiel Terry, 并以此纪念我的祖父 John D. Terry, 献给那些促成本书得以完成的所有人们。

——John

献给我的父母。

——Juha

致 谢

Nokia 研究中心的 Tony Reid 博士和佐治亚工学院的 Douglas Williams 教授对本书进行了细致的评阅, 感谢他们宝贵的建议, 这极大地提升了本书的品质。最后要对 Nokia 公司表示深深的谢意, 是 Nokia 公司给了我们这样的机会来研究这个新兴的激动人心的无线通信领域。

反馈意见

作为本书的读者,你是我们最重要的批评者和评论者,我们非常重视你所提的意见,我们想知道如何做得正确,如何做得更好,你期望出版哪些领域的书籍,以及你所带给我们的宝贵建议。

作为 Sams 出版社的负责人,我非常欢迎你的意见,你可以通过传真、电子邮件或直接写信与我联系,告诉我你是否喜欢这本书——以及如何使这本书质量更高。

请原谅我在涉及本书技术方面不能给你什么帮助,而且由于收到大量来信,我可能不能一一给你回信。

如果你要写信,请注明本书的名称和作者,以及你的姓名、电话或传真号码,我将仔细地阅读你的评论,并将将这些信息转发给本书的作者和技术编辑。

传真:	317-581-4770
Email:	feedback@samspublishing.com
通信地址:	Linda Engelman Associate Publisher Sams Publishing 201 West 103rd Street Indianapolis, IN 46290 USA

译者序

无线局域网(WLAN)是20世纪90年代计算机网络与无线通信技术相结合的产物,它使用无线信道来接入网络,为通信的移动化、个人化和多媒体应用提供了潜在的手段,并成为宽带无线接入的有效途径之一。但是长期以来WLAN的发展一直在由不同厂商推动,因此出现了多个不同的标准,包括:IEEE 802.11a、IEEE 802.11b、欧洲电信标准化协会(ETSI)的HiperLAN/1和HiperLAN/2标准等等。

IEEE 802.11b工作在2.4~2.483GHz频段,数据速率为11Mb/s,同时具有5.5Mb/s、2Mb/s、1Mb/s三个低速档次,当工作站之间距离过长或干扰太大、信噪比低于某个门限时,传输速率能够从11Mb/s自动降到5.5Mb/s、2Mb/s或者1Mb/s,通过降低传输速度来改善误码率性能。IEEE 802.11b使用带有防数据丢失特性的载波侦听多路接入/冲突避免(CSMA/CA)机制,物理层调制方式为CCK(补码键控)的DSSS(直接序列扩频)。IEEE 802.11a在整个覆盖范围内提供了更高的速度,其速率高达54Mb/s,工作频段在5GHz,采用CSMA/CA协议,在物理层采用了正交频分复用(OFDM)技术。OFDM技术将一个无线信道分解成多个子载波同时传输数据,每个子载波的速率比总速率低许多,这有利于克服无线信道的衰落,改善信号质量,提高整个网络的速度。

HiperLAN/1对应IEEE 802.11b,工作在5.3GHz,采用高斯滤波最小频移键控(GMSK)调制,最大速率为23.5Mb/s。而HiperLAN/2工作频段在5GHz,速率高达54Mb/s,物理层采用OFDM调制,在数据编码方面采用了数据串行排序和多级前向纠错,很容易实现对QoS的支持,可自动进行频率分配,并支持鉴权和加密,加强了无线接入的安全性,其协议栈具有很大的灵活性,可以适应多种固定网络类型。

本书是由位于美国得克萨斯州达拉斯的Nokia研究中心的高级研究人员John Terry和Joha Heiskala共同编写的,他们在OFDM无线局域网方面有着丰富的研究经验。本书主要讲述采用正交频分复用(OFDM)技术的宽带通信技术及其在WLAN中的应用,具体内容包括背景知识和WLAN简介、同步、编码和调制、天线分集、OFDM中的射频(RF)失真分析、IEEE 802.11网络的MAC、HiperLAN/2网络的MAC、使用FPGA快速实现WLAN原型设计等。本书对于开发OFDM无线LAN系统的工程技术人员,以及在校的高年级大学生和研究生无疑是非常有益的。

本书主要由杨晓春和何建吾翻译,胡秀兰、龚涌涛和李莉翻译了部分章节的内容,黎海涛对部分的名词术语进行了更正,在此对他们深表感谢。由于译者水平有限,再加上时间紧迫,译文难免存在许多不妥之处,恳请读者批评指正。

前 言

本书主要阐述采用正交频分复用(OFDM)的宽带通信技术,OFDM是一种特殊的多载波调制(MCM)技术,其传送数据的基本原理是把数据流分成几个并行的比特流,并将每个这样的数据流调制在单个载波或副载波上。虽然多载波调制技术的来源要追溯到20世纪50年代和60年代早期,涉及军事上的高频无线链路,但是R.W.Chang在20世纪60年代中期发表的一篇文章,首次阐明了我们现在称之为OFDM的技术。Chang对其基本原理进行了描述,即通过在没有信道间干扰(ICI)和码间干扰(ISI)的一个线性带宽受限的信道上同时传输多个消息,由Chang开发的多信道或OFDM系统不同于传统的多载波调制技术的方面在于副载波的频谱可以进行叠加,其条件是它们都是相互正交的。OFDM系统的这种特征要求放弃在老式的多载波调制系统中使用的分离单个副载波频谱的陡峭的带通滤波器。

Weinstein和Ebert于1971年首次建议使用离散傅立叶变换(DFT)和离散傅立叶逆变换(IDFT)来实现基带调制和解调,现在OFDM系统利用快速傅立叶变换(FFT)和快速傅立叶逆变换(I-FFT)来对信息数据进行调制和解调。就在Chang发表他的那一篇论文之后不久,Saltzberg对OFDM进行了性能分析,并得出这样的结论,就是在OFDM中主要的限制是信道间干扰。为了应付ICI和ISI这两种干扰,Peled和Ruiz引入了周期前缀(CP)的概念,其中不是使用空的保护空间,而是使用OFDM码的周期扩展,只要周期前缀长于该信道的冲击响应,就能有效地模拟实现周期卷积的信道。使用CP的代价是要丧失部分信号能量,这与CP的长度成正比,然而使用CP所获得的利益通常均远远大于各种信号能量损失。

现在几个有关高速率无线通信的标准都涉及OFDM技术,如欧洲的地面数字音频广播(DAB)和数字视频广播(DVB-T),估计在DAB标准中采用OFDM技术的原因之一就是在主要网络中采用单频的子网络是可能的,因此主要的和中继的广播发射机可以使用相同的副载波集合,在能从多个发射机接收信号的区域中,可以得到接收分集增益。建立在编码的OFDM技术基础上的DVB-T是三个核心DVB系统中最新的和最复杂的,OFDM技术和信道编码的结合能在色散的信道上获得可靠的传输。此外OFDM的内在结构允许可变的传输速率。

最后,本书的主题无线局域网(WLAN)是OFDM技术的另一种应用,比如下一代无线LAN标准,如IEEE802.11a,第二类高性能局域网(HiperLAN/2)和移动多媒体接入通信(MMAC)系统也已经采用OFDM技术作为它们的物理层规范,这些WLAN系统也把编码和OFDM结合起来以应付色散信道,已经显示在中等程度的色散信道上的编码OFDM调制能提高,而不是削弱传输的可靠性,这种有趣的违反直觉的现象归功于OFDM提供的内部频率分集,可以论证,这个特性是OFDM技术最具吸引力的特性。

交互式学习

显然随着OFDM技术在高速率无线通信,特别是在WLAN中的不断应用,在技术界需要

一本书来阐述 OFDM WLAN 技术,最具典型的是在教室中来学习,但是现在的工程师和科学家没有时间来参加在大学中开设的课程,所以需要这样一个工具,以使每个读者能够按照他们自己的进度来学习这些章节中的概念。我们已经提供了这样的交互式仿真环境,请访问我们的网址<http://www.sampublishing.com> 并搜索这本 OFDM 书籍,特别是该网址还包含了完整的 OFDM WLAN 物理层仿真环境,这是采用 MATLAB 来开发的,我们开发了该仿真工具来阐述在第二章到第五章中讨论的概念。

为了帮助读者学习,在每一章中都给出了一些练习题,这些练习题需要使用 OFDM 系统仿真工具和由你开发的简单程序,在本书中给出的例子都可以由仿真程序得到相同的结果。OFDM 系统仿真是通过图形用户接口(GUI)来进行的,这样便于实现系统的可重构性,GUI 从 MATLAB 命令窗口中调用,这使得用户只要点击几下鼠标就可以快速容易地测试本书中的许多概念。初学者和有经验的读者都可以获得适合自身的不同的测试条件的组合,利用这个学习工具,读者能够进一步理解本书中阐述的许多概念。此外那些有兴趣在 WLAN 环境下测试自己开发的算法的读者利用位于我们网站上的仿真程序,将可以节省几个月的软件开发时间。

预期的读者

这本书的主要读者是那些对 OFDM 技术不了解的工程师和科学家,在写作本书的过程中,我们考虑本书的主要读者可以分成两大类:一类是初学者,一类是高级读者。对于初学者来说,我们假设他们具有工程、数学和一些通信理论知识这样的背景,对他们来说这本书利用例子和演示可以提供 OFDM 理论的基本知识,比如那些研究数字图形处理的初学者,他们很有兴趣了解一个 OFDM WLAN 网络可能对视频质量带来什么样的影响。也许另一个初学者是一个射频(RF)工程师,他感兴趣的是在采用 OFDM 技术后,在接入点(AP)和移动终端(MT)中的射频子系统中增加了什么额外的需求。

对于那些对 OFDM 概念非常熟悉的工程师或科学家这样的高级读者,期望这本书是他们实践的指南和在 OFDM 中从事更先进的研究项目的引导材料。

本书的其他读者包括网络系统工程师、产品工程师或管理者,对他们来说本书中的一些数学推导略微有些高深,本书给出的解释性内容对讨论的概念提供了直观上的感受。

我们假设所有读者具有微积分、物理和随机过程等知识的背景,因此本书的大部分内容是按照大学本科层次的知识来写的,另外一些高级的研究主题,是按照硕士一年级的知识来写的。此外在每一个章节中都给出了用来理解所讨论的 OFDM 原理的必需的相关的数学知识,正如前面所提到的,本书也提供了解释性的内容,以从数学描述中更清楚地理解这些 OFDM 原理。

关于有关读者的最后一点就是:为了充分地 from 本书获得更多的知识,读者最好能熟悉使用 MATLAB。

我们希望本书能吸引广大的读者,这正是我们写作的目的。当然,没有一本书能包罗万象。但是,无论你对 OFDM WLAN 的兴趣在哪里,本书都能满足你的要求。

本书的组成

本书的组成如下,第一章是“基础知识和无线 LAN 概述”,主要阐述发展背景和 OFDM WLAN 的概况,发展背景涵盖了在数字信号和随机处理中的相关概念,期望读者能从这一章获得基本的知识以了解后面章节中的概念。第二章到第五章讲述的是 OFDM WLAN 的物理层规范,第二章“同步”详细讨论了在 OFDM 网络中使用的许多常用的同步算法,特别是定时同步算法,它包括包探测、码定时恢复和取样时钟跟踪,同时涵盖的还有频率、信道估计和信道空闲评估(CCA)算法。第三章是“调制和编码”,简要概述了调制和编码技术,特别地,相移键控(PSK)和正交幅度调制(QAM)这些在 OFDM WLAN 标准中出现的技术都给予了讨论。在信道编码方面,讨论了分组码和卷积码,并给出了 IEEE802.11a 物理规范的几种工作模式的性能评估。第三章可以认为是当前 OFDM WLAN 系统中的核心思想或关键技术。

第四章是“天线分集”,主要阐述未来的 OFDM WLAN 系统中的核心思想或关键技术,讨论了在 OFDM 的环境下几个通用的发射和接收分集方案,示例显示当采用这些技术后系统在错误率性能方面有很大的提高。第五章是 OFDM 中的射频(RF)失真分析,主要关注因 RF 非线性所造成的 OFDM 系统的系统失真问题,对在所有 OFDM 系统中出现的峰值-平均功率(PAPR)问题特别给予了关注,处理这一问题的许多通用的技术在这一章中给予了分析,此外也阐述了其他的系统限制,如相位噪声和相位内和正交(IQ)不平衡性。

第六章和第七章描述了介质访问控制(MAC)层。第六章总结了 IEEE802.11a MAC,而第七章描述了 HiperLAN/2 的 MAC,这两章详细说明了 MAC 层和物理层的相互作用。

有趣的是,OFDM 的一个主要缺点是涉及 FFT 和 IFFT 的实时实现的复杂性,然而,稳步提高的半导体处理技术、现场可编程门阵列(FPGA)技术和成本合理的专用集成电路(ASIC)技术使得实时的 OFDM 原型样机成为可能。第八章“WLAN 的快速原型设计”主要是要阐述使用 FPGA 技术实现 IEEE802.11a 无线的实时原型中所涉及到的问题。

目 录

前言	I
第一章 基础知识和无线 LAN 概述	1
随机过程和随机变量概述	1
随机变量	1
总体均值	2
离散信号处理概述	4
离散信号	4
离散系统	5
过滤的随机过程	5
离散傅立叶变换(DFT)	7
数字通信系统的组成	8
信息源格式处理	9
信源编码	11
信道编码	12
调制	16
多址接入技术	16
信道模型	18
正交频分复用(OFDM)无线局域网(WLAN)简介	20
符合 WLAN 标准的介质访问控制(MAC)	22
WLAN 标准的物理层规范	24
单载波和 OFDM 的比较	26
同步错误	27
频率误差的影响	27
参考文献	30
第二章 同步	32
定时估算	33
分组检测	33
符号定时	38
取样时钟的跟踪	42
频率同步	44
频率误差估算的 DFT 推导方法	47
关于频率误差估算算法的讨论	48
频率误差估算的可选技术	48
载波相位跟踪	49
信道估算	51

信道估算的频域方法	52
信道估算的时域方法	52
信道估算的时域和频域方法的分析	53
信道估算的加强	54
信道空闲评估(CCA)	54
信号质量	55
参考文献	56
第三章 调制和编码	58
调制	58
相干调制	59
相干调制的检测	64
非相干调制	65
线性和非线性调制	67
交织	68
分组交织器	68
卷积交织器	69
IEEE 802.11a 中的交织	70
信道编码	71
IEEE 802.11a 的性能	76
网格编码调制	78
分组码	80
Turbo 码	81
参考文献	82
第四章 天线分集	84
基本知识	84
衰落环境下的容量限制	84
多输入-多输出(MIMO)系统中的信道模型	87
分集简介	88
接收分集	89
选择分集	89
最大比例组合(MRC)	90
发射分集	92
衰落信道的发射分集设计标准	92
延迟分集	94
网格空时码	95
分层空时码	100
分组空时码	100
多维空时码	102
球面编码	103
在 OFDM 框架内的球面空时码(SSTC)	103

单天线系统中的 Water-Filling	105
多天线系统中的 Water-filling	106
自适应调制	107
参考文献	111
第五章 OFDM WLAN 系统中的射频失真分析	116
射频子系统组件	116
放大器分类和失真	117
减小非线性失真的预失真技术	120
恢复限幅幅度的判决辅助方法	122
恢复限幅幅度的 Bayesian 推理方法	125
没有限幅时放大器非线性的影响	127
自适应预失真技术	129
减小放大器非线性失真的编码技术	135
部分传输序列技术	135
PTS 算法的改进	136
选择性映射	138
相位噪声	139
IQ 不平衡	141
参考文献	143
第六章 IEEE 802.11 网络的介质访问控制(MAC)	146
MAC 概述	146
MAC 服务	147
MAC 帧	148
MAC 信息管理	148
MAC 系统结构	148
基本服务组	149
扩展服务组	150
MAC 帧格式	151
IEEE 802.11 帧格式	151
MAC 帧子类型	155
帧分段	156
MAC 数据服务	158
分布式协调功能(DCF)	158
点协调功能	161
使用 RTS/CTS 来进行帧序列交换	164
MAC 管理服务	164
功率管理	165
同步管理	168
过程管理	171
私密管理	174

MAC 管理信息库(MAC MIB)	175
管理属性组	175
MAC 属性组	177
参考文献	178
第七章 HiperLAN/2 网络的介质访问控制(MAC)	180
网络结构	181
DLC 功能	182
MAC 概述	182
基本 MAC 消息格式	183
传输信道	184
PDU 序列	185
逻辑信道	186
MAC 帧结构	188
传输信道顺序	188
调度寻址	189
构造 MAC 帧	190
MAC 帧处理	191
接入点	191
移动终端	191
参考文献	192
第八章 WLAN 的快速原型设计	193
快速原型设计介绍	193
快速原型设计流程举例	194
好的数字设计方法	197
一个 WLAN 系统的快速原型设计	202
IEEE 802.11a 发射机	203
IEEE 802.11a 接收机	205
IEEE 802.11a 基带演示模型	206
参考文献	208

第一章 基础知识和无线 LAN 概述

- 随机过程和随机变量概述
- 离散信号处理概述
- 数字通信系统中的器件
- OFDM WLAN 简介
- 单载波和 OFDM 的比较
- 参考文献

在详细阐述正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术之前,有必要先介绍相关的背景知识,本章就是要给出 OFDM 技术的基础知识,这一章的内容包括随机过程概述、离散信号与系统和离散傅立叶变换(DFT)。在给出必要的数学基础之后,我们将简要介绍数字通信系统和 OFDM 通信系统,最后归纳一下当前的 OFDM 无线 LAN 标准,并在更高层面来比较单载波系统和 OFDM 系统。

通信系统的主要目的就是通过信道传送信息,而数字通信系统的目的则是用数字方式将信息从一个地方传送到另一个地方。数字通信的优点就是相对于模拟通信来说能够很容易地恢复数字信号。模拟信号是时域上连续的波形,引入到信号带宽内的任何噪声都不能由放大或滤波而去除。相反,数字信号是由一定的离散数值形成的,甚至在信号有噪声的情况下,也有可能可靠地和准确地恢复出信号的比特流。在下面的章节中,为了便于阐述后面的概念,我们首先回顾一下随机过程和离散信号处理中的一些基本内容。

随机过程和随机变量概述

回顾随机过程的必要性在于在本书中,许多数字通信信号[20、21、22、25]都能用随机过程来表征,一般来说,可以大体上把信号分成两类:确定性信号和随机信号。确定性信号或波形就是在任何时刻都是能确定的,通常表示成时间的函数,相反,随机信号或波形在任何时刻总是呈现出不确定性,这是由于一个概率事件的每一个结果 ξ 服从随机变量的分布,也就是说确定性信号可以通过反复的测量而能准确地复制,而随机信号则不能。

一个随机过程是一个概率性事件的每一个结果与函数 $X(t, \xi)$ 之间的对应关系,其中 t 是时间,也就是说,一个随机过程是一组取决于 ξ 的随时间变化的函数。在一个较长的时间范围内观察随机变量,就能获得一定的规律,这些行为通常由概率和随机平均值来表征,如均值、方差和相关。平均值的特性,如平稳性和遍历性,也将在本章中简要介绍。

随机变量

一个随机变量表征了一个离散或连续的随机事件和一个实数间的对应关系,随机变量 X 的分布函数 $F_X(\alpha)$ 是

$$F_X(\alpha) = \Pr(X \leq \alpha) \quad (1.1)$$

其中 $\Pr(X \leq \alpha)$ 表示随机变量 X 所取得的值小于或等于实数 α 的概率。分布函数 $F_X(\alpha)$ 具有

如下的特性:

- $0 \leq F_X(\alpha) \leq 1$
- $F_X(\alpha) \leq F_X(\beta)$ 如果 $\alpha \leq \beta$
- $F_X(-\infty) = 0$
- $F_X(+\infty) = 1$

随机变量的另一个有用的随机特征是概率密度函数(pdf), $f_X(\alpha)$, 定义为

$$f_X(\alpha) = \frac{\partial}{\partial \alpha} F_X(\alpha) \quad (1.2)$$

根据 $F_X(\alpha)$ 的特性, 并注意到式(1.2) 中的关系, 可以得到概率密度函数的特性:

- $f_X(\alpha) \geq 0$
- $\int_{-\infty}^{\infty} f_X(\alpha) d\alpha = F_X(+\infty) - F_X(-\infty) = 1$

因此 pdf 总是单位区域一个非负的函数。

总体均值

实际上一个随机变量的完全的统计特征几乎是不可能得到的, 然而在许多实际应用中, 随机变量的均值或数学期望值就已经足够了。在本书后面的章节中, 主要用到的是随机变量或随机变量的函数的数学期望。一个连续随机变量的均值或数学期望定义为

$$m_X = E\{X\} = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha f_X(\alpha) d\alpha \quad (1.3)$$

而离散的随机变量的均值或数学期望为

$$m_X = E\{X\} = \sum_k \alpha_k Pr(X = \alpha_k) \quad (1.4)$$

其中 $E\{\cdot\}$ 为数学期望算符。在通信系统中一个非常重要的量是随机变量 X 的均方值, 对连续随机变量来说定义如下

$$E\{X^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha^2 f_X(\alpha) d\alpha \quad (1.5)$$

而对于离散随机变量来说则是

$$E\{X^2\} = \sum_k \alpha_k^2 Pr(X = \alpha_k) \quad (1.6)$$

一个随机变量的均方值是对随机变量平均功率的测量, X 的方差是二阶中心矩的均值, 定义为

$$\sigma_X^2 = E\{(X - m_X)^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} (\alpha - m_X)^2 f_X(\alpha) d\alpha \quad (1.7)$$

注意对于离散的随机变量的方差也可以类似地得到, 只是将积分换成求和。方差是对随机变量 X “随机” 分布的度量。另一个需要经常使用的值是随机变量 X 的标准方差 σ_X , 定义为其方差的平方根, 值得注意的一点就是随机变量的均方值和方差的关系, 即

$$\begin{aligned} \sigma_X^2 &= E\{X^2 - 2Xm_X + m_X^2\} \\ &= E\{X^2\} - 2E\{X\}m_X + m_X^2 \\ &= E\{X^2\} - m_X^2 \end{aligned} \quad (1.8)$$

由(1.8) 式可知, 方差就是均方值和均值平方的差。

在研究随机变量中, 另外两个重要的参数就是相关和协方差, 这两个量描述两个或多个随

机变量之间的相互独立性,复随机变量 X 和 Y 的互相关 r_{XY} 定义为

$$r_{XY} = E\{XY^*\} \quad (1.9)$$

其中 $*$ 表示复随机变量的复共轭,描述随机变量之间更密切的一个量是它们的协方差 c_{XY} ,定义为

$$c_{XY} = E\{[X - m_X][Y - m_Y]^*\} = E\{XY^*\} - m_X m_Y^* \quad (1.10)$$

很明显,如果 X 或 Y 是零均值,则协方差等于相关,随机变量 X 和 Y 无须从分离的概率性事件中得到,实际上 X 和 Y 可以是单个事件在不同时刻 t_1 和 t_2 的采样,此时互相关 r_{XY} 和协方差 c_{XY} 将分别变成自相关 $R_X(t_1, t_2)$ 和自协方差 $C_X(t_1, t_2)$, $R_X(t_1, t_2)$ 和 $C_X(t_1, t_2)$ 定义如下

$$\begin{aligned} R_X(t_1, t_2) &= E\{X(t_1)X^*(t_2)\} \\ C_X(t_1, t_2) &= E\{[X(t_1) - m_X(t_1)][X(t_2) - m_X(t_2)]^*\} \end{aligned} \quad (1.11)$$

这样自相关和自协方差可以衡量相同随机过程中两个时刻上取样值的关联程度。

有许多随机变量中,随机变量相互之间没有依赖关系,这样的一些随机变量是统计独立的,关于统计独立性的具体的表述和含义定义如下。

定义 1 两个随机变量 X 和 Y 是统计独立的,如果它们的联合概率密度函数等于它们各自的概率密度函数的乘积,即:

$$f_{XY}(\alpha, \beta) = f_X(\alpha)f_Y(\beta) \quad (1.12)$$

当两个随机变量之间的互相关函数 r_{XY} 等于它们均值的乘积,则这两个随机变量之间具有弱独立性,即

$$r_{XY} = E\{XY^*\} = m_X m_Y^* \quad (1.13)$$

满足式(1.13)的两个随机变量是不相关的。注意由于

$$c_{XY} = r_{XY} - m_X m_Y^* \quad (1.14)$$

如果它们的协方差是零的话则这两个随机变量 X 和 Y 是不相关的。需要注意的是统计独立的随机变量总是不相关的,但是反过来却不一定正确。

至此,多数的讨论主要集中在随机变量,在这一节中,我们将主要讨论随机过程。以前我们说一个随机过程是一个概率性事件的每一个结果与函数 $X(t, \xi)$ 之间的对应关系。由许多结果得到的 $X(t, \xi)$ 的集合定义了 $X(t, \xi)$ 的全体,另一方面,随机过程的更有用的定义是一系列有次序的随机变量。如果随机过程的统计量不受在时间原点的一段时间位移的影响,则说这个随机过程是严(严格意义上)平稳的,换言之,其统计量是取决于所观察时间的长短,而不依赖于其开始的时间。如果随机过程的均值和方差不随在时间原点上的时间位移而变化,则说该随机过程是宽(广义上)平稳的,即:

$$m_X = E\{X(k)\} = \text{常数}, \forall k$$

和

$$R_X = (\tau + k, k) = R_X(\tau)$$

严平稳过程一定是宽平稳过程,但是反过来则是不对的。在通信理论中大多数的随机过程都设定为宽平稳过程(WSS),从实用角度来看,没有必要使一个随机过程在所有时间上都是平稳的,只要在我们感兴趣的所观察的时间间隔上是平稳的就可以了。需要注意的是一个宽平稳过程的自相关函数只与时间差 τ 有关,对于零均值的宽平稳过程, $R_X(\tau)$ 表示随机过程 X 在