

国防通信与信息技术译丛

6010000000



装备科技译著出版基金

 Springer

扩展频谱 通信系统原理

(第3版)

Principles of Spread-Spectrum
Communication Systems
Third Edition

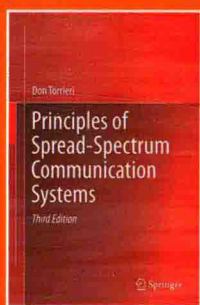
【美】 Don Torrieri 著

牛英滔 朱义勇 胡绘斌 等译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



**Principles of Spread-Spectrum
Communication Systems
Third Edition**

扩展频谱（简称扩谱）通信技术在电信工程领域的广泛应用，以及新的数学方法的发展推动了本书的再版。本书对扩谱通信系统进行了综合且深入的论述，适合具有扎实数字通信理论基础的研究生和在职工程师使用。本书论述的重点在于原理，而非其他许多书中介绍的已有的特定系统。本书的主要目标是对扩谱系统的基本原理进行简明清晰的说明，侧重于介绍有助于未来研究的理论基础和数学分析方法。对于本书所述主题的选择，作者折中考虑了实用意义以及研究人员和系统设计人员的兴趣。在第3版中，全书对经典理论重新进行了推导，并给出了最新的研究结果，这些会将读者带入领域的前沿。此外新增了DS-CDMA蜂窝网络、FH-CDMA技术的Ad Hoc网络、自适应阵列与滤波器等章节，其余章节也经过了彻底的修订。书中每章结尾列出的思考题用于帮助读者巩固知识，并提供分析技巧训练。书中列出的参考资料建议读者深入研究，或作为其他方面研究的参考资料。

责任编辑：张冬晔 dyzhang@ndip.cn
责任校对：李娟娟
封面设计：蒋秀芹

 Springer



定价：169.00 元



装备科技译著出版基金



国防通信与信息技术译丛

扩展频谱通信系统原理

(第3版)

Principles of Spread-Spectrum Communication Systems

(Third Edition)

[美] Don Torrieri 著

牛英滔 朱义勇 胡绘斌

钱璟 关胜勇 郝瑞 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2016-102 号

图书在版编目(CIP)数据

扩展频谱通信系统原理. 第3版 / (美)唐·托列里
(Don Torrieri)著;牛英滔等译. —北京:国防工业出版社,
2019.5

(国防通信与信息技术译丛)

书名原文:Principles of Spread-Spectrum
Communication Systems(Third Edition)
ISBN 978-7-118-11688-5

I. ①扩… II. ①唐… ②牛… III. ①扩频通信—通
信系统 IV. ①TN914.42

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第063694号

First published in English under the title
Principles of Spread-Spectrum Communication Systems, 3rd edition
Edited by Don Torrieri
Copyright © 2015 Springer International Publishing Switzerland
This edition has been translated and published under licence from Springer International
Publishing AG.

All rights reserved.

本书简体中文版由 Springer International Publishing AG 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

※

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100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 37½ 字数 694 千字
2019年5月第3版第1次印刷 印数1—2000册 定价169.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者前言

扩展频谱(简称扩谱)通信是指用于传输信号的射频带宽远远大于信号自身带宽的一种通信方式。扩谱通信技术在抗干扰、抗截获、抗多径衰落以及多址通信能力等方面具有一般无线通信技术无可比拟的优势。因此自诞生之日起,就在军事通信中占有极为重要的地位,是军事无线通信的核心技术之一。近年来,随着4G/5G移动通信系统、认知无线网络、无线传感器网、物联网等民用通信系统和网络的迅速发展,扩谱技术在民用通信中也得到了越来越广泛的应用。因此对扩谱通信技术进一步深入研究的需求非常迫切,了解国外扩谱通信方面新的权威性著作亦成为急需。

《扩展频谱通信系统原理》(第3版)正是这样一本专著。本书系统阐述了扩谱通信中的编码调制、扩谱码同步、分集接收、扩谱信号检测、迭代信道检测等一系列基础问题,重点论述了扩谱通信的基本原理和基础理论。本书内容全面深入,概念清晰,理论分析严谨,仿真、习题和参考资料丰富,是当前最新的扩谱通信基础理论著作之一。

本书作者 Don Torrieri 博士在美国陆军研究所长期从事扩谱通信及其相关技术的研究,在扩谱通信领域享有很高的国际声誉。他是美国 IEEE 学会的高级会员,先后出版专著4部,发表论文数十篇。本书是作者在2005年的第1版和2011年第2版的基础上,经过全面修订而成,扩充了大量扩谱通信领域的最新进展。相比第1版和第2版,第3版内容更新、更充实、更全面。本书不仅具有很高的学术水平,而且对相关领域的进一步研究具有引领作用,可作为从事无线通信系统研究与设计的科研人员及工程技术人员的参考用书,也可作为相关专业的研究生用书。

本书的前言、第2、4、8章和索引由牛英滔翻译,第1章由关胜勇翻译,第3章由郝瑞翻译,第5、9、10章由朱义勇翻译,第6章和附录由胡绘斌翻译,第7章由钱璟翻译。牛英滔负责全书的统稿和校对,姚富强对全书进行了全面审校。参与校对和译稿资料整理的还有朱勇刚、林敏、许拔、肖晨飞、张敬义、齐阳洋、汤尚、段瑞杰、惠显扬等。原书作者 Don Torrieri 博士通过电子邮件对本书的翻译提出了有益的建议。国防工业出版社的张冬晔编辑以饱满的热情和细致的

工作使本书的翻译工作得以进一步完善。此外,本书的出版得到了中国科学院院士尹浩和中国工程院院士陆建勋的大力推荐,并得到了装备科技译著出版基金和江苏省自然科学基金(BK20151450)的资助。在此,一并表示诚挚的感谢!

在本书翻译过程中,我们力求忠实、准确地把握原著内涵,同时尽可能按中文习惯进行表述;但由于译者水平有限,书中难免有错误和不准确之处,恳请广大读者批评指正,并欢迎与译者直接交流。

译 者

niuyingtao@126.com

2018年12月于南京

前 言

扩展频谱(简称扩谱)通信系统的持久活力和对其进行分析所需的数学新方法的发展是推动本书再版的动机。新版力图使读者理解该领域的最新发展现状。在第3版中,近20%的内容是全新的,包括若干新的部分,如新增加的自适应阵列与滤波器的章节及码分多址网络的章节,其余章节也经过了彻底修订。此外,我也删除了相当数量的内容并用更加明确的结果来替代它们。

本书对扩谱通信系统进行了更为综合和深入的论述,适于具有扎实数字通信理论基础的研究生和在职工程师使用。正如本书标题所指出的,本书的重点在于原理而非其他许多书中所述的特定现有的或已设计好的系统。本书的主要目标是对扩谱系统的基本原理进行简明清晰的说明,侧重于支撑未来研究的理论基础和数学分析方法。对于本书特定主题的选择,我折中考虑了这些主题的实用意义以及研究人员和系统设计人员的兴趣。全书对经典理论重新进行了推导,并给出了最新的研究结果,这些会将读者带入该领域的前沿。其中的分析方法和部分内容的描述也可应用于各类通信系统。每章结尾列出的思考题用于帮助读者巩固知识,并提供分析技巧的训练。我所列出的参考文献,建议读者深入研究或作为其他研究的参考资料。

扩谱信号是一种经过额外调制从而显著扩展信号带宽的信号,扩展后的信号带宽远超编码后的数据调制所需的带宽。扩展频谱通信系统可用于抑制干扰、增强安全通信的检测和处理难度、适应衰落和多径信道,并可提供多址接入能力而无须要求全网的同步等。最实用的主流扩谱系统是直接序列扩谱(简称直扩)系统和跳频扩谱(简称跳频)系统。

现在并没有制约扩谱通信有效性的基本理论障碍。存在这样一个重要但并不显而易见的事实,即扩谱信号带宽的增加可能使得通过接收滤波器的噪声功率超出解调器所要求的噪声功率。然而,当任何信号和高斯白噪声通过一个与信号匹配的滤波器时,采样滤波器输出的信噪比仅取决于信号能量与噪声功率谱密度之比。因此,输入信号的带宽是无关紧要的,且扩谱信号并无固有的内在限制。

第1章回顾了编码和调制理论的基本结论,这些结论对于全面理解扩谱系

统是必需的。信道编码也称为纠错编码或差错控制编码,它对于充分发挥扩谱系统的潜在能力具有至关重要的作用。尽管直扩系统能够极大地抑制干扰,然而实际的直扩系统仍需信道编码来处理残留的干扰及诸如衰落之类的信道损伤。尽管设计跳频通信系统的目的是为了躲避干扰,但它也可能会跳入一个非期望的频谱区域,这就需要信道编码来保证系统所需的性能。本章中,编码和调制理论用于推导所需要的接收机计算方法及译码后信息比特的错误概率,重点阐述在扩谱系统中已被证明最为有用的编码与调制类型。

第2章阐述了直扩系统的基本原理。直接序列调制将高速扩谱序列直接加在低速数据序列上,从而使得发射信号具有相对较宽的带宽。在接收机中移除扩谱序列使得带宽减小,从而能够利用合适的滤波器来消除很大一部分干扰。本章首先阐述基本的扩谱序列和波形,然后详细分析直扩接收机如何抑制各种干扰。

第3章介绍了跳频系统的基本原理。跳频是发射信号的载波频率周期性改变的通信方式。跳频系统的这种时变性赋予系统很强的潜在抗干扰能力。直扩系统是依靠频谱扩展、解扩及滤波来抑制干扰,而跳频系统抑制干扰的机理是躲避干扰。当躲避失败时,由于载波频率周期性改变,跳频信号仅被暂时干扰。通过广泛采用信道编码,干扰对跳频系统的影响将进一步减轻。从这一点来说,跳频系统比直扩系统更需要信道编码。跳频系统的基本概念、频谱和性能,以及编码和调制问题都在本章进行了介绍。本章还研究了部分频带干扰和恶意干扰的影响。此外,还对频率合成器设计中最重要的问题进行了阐述。

第4章的中心是同步问题。扩谱接收机必须产生与接收的直扩序列或跳频图案同步的直扩序列或跳频图案。也就是说,相应的直扩序列码片或跳频驻留间隔必须精确或近似一致。任何偏差都将导致解调器输出信号幅度的下降,下降幅度与自相关或部分自相关函数有关。虽然在收发信机中使用精确时钟能够在某种程度上降低接收机定时的不确定性,但时钟漂移、波动范围的不确定性或多普勒频移仍然可能导致同步问题。扩谱码同步,即直扩码序列或跳频图案同步,可从独立发送的导频或定时信号中获取。虽然将接收信号反馈给发射机可实现或可辅助实现扩谱码同步,然而为减小功率及开销,大多数扩谱接收机都是通过直接处理接收信号来获得扩谱码同步。本章对提供粗同步的捕获和提供精同步的跟踪都进行阐述。由于在一个完整的扩谱系统中,捕获部分总是重点设计的内容和最昂贵的部件,因此本章重点讨论捕获问题。

自适应滤波和自适应阵列作为通信系统的组成部分得到了广泛应用。第5章的重点是某些自适应滤波器和自适应阵列,它们可利用扩谱信号特殊的频谱特征从而使得干扰抑制程度超出解扩或解跳本身的固有能力。本章给出了用

于抑制窄带干扰及主要用于抑制宽带干扰的自适应滤波器。对用于直扩系统及跳频系统的自适应阵列也进行了阐述,并显示出它们具有很高的潜在干扰抑制能力。

第6章对衰落中最重要的问题和用于抗衰落的分集方法的作用进行了总体描述。衰落是指由通信信道的时变性所引起的接收信号强度的变化。它主要由发射信号的多径分量相互叠加而引起的,且随传播媒质物理特性的变化而改变。抗衰落的主要手段是分集,它主要利用了同一信号的两个或多个独立衰落副本之间潜在的冗余度。作为多数直扩系统的核心,Rake解调器并非简单地消除多径信号,而是能够充分利用所不希望的多径信号。多载波直扩系统是另一种具有实用优势的利用多径信号的方法。

多址接入是指多个用户共享公共传输媒质并相互进行通信的能力。若发射信号是正交的或在某种意义上是可分离的,那么就可实现无线多址通信。信号可通过时间(时分多址(TDMA))、频率(频分多址(FDMA))或扩谱码(码分多址(CDMA))来区分。

第7章阐述了适用于CDMA系统的扩谱序列和跳频图案的一般特征,相应的CDMA系统包括直接序列CDMA(DS-CDMA)系统和跳频CDMA(FH-CDMA)系统。CDMA中应用扩谱调制可允许多个用户在同一频段上同时传输信号。虽然所有信号都使用分配到的全部频谱,但扩谱序列或跳频图案却各不相同。信息论表明,对于一个孤立的小区,仅当应用了最优多用户检测时,CDMA系统才能获得与TDMA或FDMA系统相同的频谱效率。然而,即使对于单用户检测,CDMA对于移动通信网络也是很有优势的,因为它无须在小区间协调频率和时隙,允许载波频率在相邻小区间复用,且对用户数量的上限没有严格要求,并且具有抗干扰与抗截获能力。用户检测技术潜力巨大但实际应用困难,本章也对其进行了推导和阐述。

第8章分析了多址干扰在采用了DS-CDMA和FH-CDMA的移动Ad Hoc网络及蜂窝网络的影响。使用扩谱技术的移动通信网络中变得显著的现象和问题包括隔离区、保护带、功率控制、速率控制、网络策略、小区扇区化及各种扩谱参数的选择等。网络性能的基本度量,即中断概率,在Ad Hoc和蜂窝网络,以及DS-CDMA和FH-CDMA系统中都进行了推导。对在DS-CDMA蜂窝网络中所需的捕获及同步技术也进行了阐述。

第9章研究了迭代信道估计在设计先进扩谱系统中的作用。信道参数的估计,如衰落幅度和干扰加噪声的功率谱密度等,对软判决译码的有效使用必不可少。信道估计可通过接收机处理收到的导频信号来实现,但发射导频信号会增加开销,如数据吞吐量下降等。直接从接收的数据符号中得到信道的最大

似然估计通常极为困难。另一种有效的方法是使用 Turbo 码或低密度奇偶校验码。期望最大化算法在本章中进行了推导和说明,它能够为最大似然方程提供一种迭代近似解,且与迭代解调、译码算法天然契合。本章阐述和分析了先进扩谱系统中应用迭代信道估计、解调、译码的两个例子。它们为设计先进系统所要进行的计算提供了良好的例证。

认知无线电、超宽带以及军事电子信息系统通常要求具备检测扩谱信号的能力。针对扩谱序列及跳频图案未知或无法被检测器精确估计的问题,第 10 章对扩谱信号的检测问题进行了分析。因此,检测器不能简单模仿扩谱通信接收机的处理方法,而是需要进行其他处理。本章仅限于研究扩谱信号的检测方法,而不涉及解调或译码。然而,根据检测理论对扩谱信号进行检测会导致检测装置难以实现。另一种方法是使用无线场强计或能量检测器,即仅依靠能量测量来确定未知信号的存在性。能量检测器不仅可用于扩谱信号的检测,还可用于认知无线电和超宽带系统的感知。

书后的 4 个附录对高斯随机过程和中心极限定理、常用特殊函数、信号特征和基本概率分布进行了详细的数学描述。

撰写本书时,我很大程度上依赖于事前先充分准备的笔记和文档,以及我在美国陆军研究所工作时获得的视角。非常感谢我的同行 Matthew Valenti、Hyuck Kwon 和牛英滔,他们审阅了原始书稿的部分章节,并提出了犀利而又出色的审阅意见。还非常感激我的妻子 Nancy,她不仅给予我坚定的支持,而且还在文本编辑方面给予了我广泛的协助。

目 录

第 1 章 信道编码和调制	1
1.1 分组码	1
1.1.1 硬判决译码的错误概率	7
1.1.2 软判决译码与脉冲幅度调制的编码度量	11
1.1.3 正交信号的编码度量	18
1.1.4 无编码 FSK 符号检测	22
1.1.5 性能实例	24
1.2 卷积码与格型码	26
1.2.1 契尔诺夫界	37
1.2.2 网格编码调制	39
1.3 交织器	41
1.4 经典级联码	43
1.5 Turbo 码	44
1.5.1 MAP 译码算法	45
1.5.2 并行级联 Turbo 码	48
1.5.3 卷积 Turbo 码	49
1.5.4 分组 Turbo 码	53
1.5.5 Turbo 网格编码调制	54
1.5.6 串行级联 Turbo 码	55
1.5.7 Turbo 乘积码	55
1.6 迭代解调与译码	57
1.6.1 比特交织编码调制	60
1.6.2 仿真实例	61
1.7 低密度奇偶校验码	65
1.7.1 非规则重复累加码	68
1.7.2 LDPC 码性能	70
1.8 思考题	71

第 2 章 直接序列扩谱系统	73
2.1 定义与概念	73
2.2 扩谱序列与波形	76
2.2.1 随机二进制序列	77
2.2.2 移位寄存器序列	79
2.2.3 最大序列	82
2.2.4 自相关函数和功率谱	84
2.2.5 特征多项式	87
2.2.6 长周期非线性序列	91
2.2.7 码片波形	94
2.2.8 部分相关序列	94
2.3 BPSK 调制系统	95
2.3.1 载波频率上的单音干扰	99
2.3.2 一般的单音干扰	100
2.3.3 高斯干扰	103
2.4 四进制系统	104
2.4.1 复二进制扩谱序列	110
2.4.2 采用信道编码的系统	112
2.5 脉冲干扰	112
2.6 非相干直扩系统	120
2.7 基于带通匹配滤波器的解扩	123
2.7.1 声表面波滤波器	126
2.7.2 抗多径的相干系统	128
2.8 思考题	132
第 3 章 跳频扩谱系统	134
3.1 概念和特征	134
3.2 正交 FSK 跳频	138
3.2.1 系统说明	138
3.2.2 多音干扰	143
3.3 CPM 和 DPSK 调制的跳频系统	145
3.3.1 FH/CPM	146
3.3.2 FH/DPSK	152
3.4 FH/CPM 的功率谱密度	154

3.5	解跳后 FH/CPFSK 信号的数字解调	157
3.6	部分频带干扰下的编码	161
3.6.1	Reed-Solomon 编码	163
3.6.2	网格编码调制	168
3.6.3	Turbo 码与 LDPC 码	170
3.7	混合扩谱系统	170
3.8	频率合成器	172
3.8.1	直接频率合成器	172
3.8.2	直接数字频率合成器	174
3.8.3	间接频率合成器	176
3.8.4	多环频率合成器	179
3.8.5	小数分频频合器	180
3.9	思考题	181
第 4 章	扩谱码同步	183
4.1	扩谱序列的捕获	183
4.1.1	匹配滤波器捕获	186
4.1.2	序贯估计	188
4.2	顺序搜索捕获	189
4.2.1	切比雪夫不等式的应用	192
4.2.2	均匀分布下的均匀搜索	193
4.2.3	连续计数双驻留捕获	194
4.2.4	单驻留和匹配滤波捕获	195
4.2.5	上下双驻留捕获	196
4.2.6	惩罚时间	198
4.2.7	其他搜索策略	199
4.2.8	捕获时间的概率密度函数	201
4.2.9	替代分析	202
4.3	相关器捕获	205
4.4	序贯捕获	212
4.5	扩谱码跟踪	213
4.6	跳频图案	218
4.6.1	匹配滤波器捕获	218
4.6.2	顺序搜索捕获	225

4.6.3	跳频图案跟踪	230
4.7	思考题	231
第5章	自适应滤波器与阵列	233
5.1	实梯度与复梯度	233
5.1.1	实梯度	233
5.1.2	复梯度	233
5.2	自适应滤波器	236
5.2.1	最优权向量	236
5.2.2	柯西-施瓦茨不等式	237
5.2.3	最速下降法	238
5.2.4	LMS 算法	238
5.2.5	均值收敛	239
5.2.6	失调	240
5.3	窄带干扰的消除	242
5.3.1	时域自适应滤波器	243
5.3.2	变换域处理	245
5.3.3	非线性滤波	247
5.3.4	自适应 ACM 滤波器	252
5.4	宽带干扰消除	254
5.4.1	拉格朗日乘子	254
5.4.2	最小功率约束准则	255
5.4.3	Frost 算法	256
5.4.4	均值收敛	257
5.5	最优阵列	259
5.6	用于直扩系统的自适应阵列	262
5.6.1	极大极小算法的推导	262
5.6.2	处理器的实现	265
5.6.3	收敛性分析	269
5.6.4	极大极小算法仿真	271
5.7	跳频系统的自适应阵列	274
5.7.1	初始和主处理器	274
5.7.2	预测自适应滤波器	277
5.7.3	仿真实验	279

5.8	思考题	281
第6章	衰落与分集	283
6.1	路径损耗、阴影与衰落	283
6.2	时间选择性衰落	286
6.2.1	衰落速率与衰落持续时间	291
6.2.2	空间分集与衰落	292
6.3	频率选择性衰落	295
6.3.1	信道冲激响应	296
6.4	衰落信道的分集	298
6.4.1	最大比合并	299
6.4.2	相干解调及其度量	300
6.4.3	等增益合并	308
6.4.4	选择分集	317
6.4.5	发射分集	321
6.5	信道编码	324
6.5.1	比特交织编码调制	331
6.6	Rake 解调器	331
6.7	跳频与分集	339
6.8	多载波直扩系统	340
6.8.1	多载波 CDMA 系统	342
6.8.2	具有频域均衡的 DS-CDMA 系统	356
6.9	思考题	361
第7章	码分多址接入	363
7.1	信息论的应用	363
7.2	DS-CDMA 的扩谱序列	366
7.2.1	同步通信	368
7.2.2	异步通信	371
7.2.3	误符号率	376
7.2.4	复四进制序列	377
7.3	随机扩谱序列系统	379
7.3.1	Jensen 不等式	379
7.3.2	基于 BPSK 的直扩系统	380
7.3.3	四相直扩系统	388

7.4	FH-CDMA 中的跳频图案	391
7.5	多用户检测器	394
7.5.1	最优检测器	395
7.5.2	常规单用户检测器	398
7.5.3	去相关检测器	399
7.5.4	最小均方误差检测器	402
7.5.5	自适应多用户检测	405
7.5.6	干扰抵消器	406
7.5.7	跳频多用户检测器	409
7.6	思考题	410
第 8 章	移动 Ad Hoc 网和蜂窝网	412
8.1	条件中断概率	412
8.1.1	举例	418
8.2	DS-CDMA 移动 Ad Hoc 网络	420
8.2.1	保护区	425
8.2.2	举例	427
8.3	DS-CDMA 蜂窝网	430
8.3.1	捕获与同步	431
8.3.2	功率控制	433
8.3.3	自适应速率控制	436
8.3.4	空间分布和网络模型	436
8.4	DS-CDMA 上行链路	439
8.4.1	上行功率控制	440
8.4.2	上行速率控制	441
8.4.3	性能举例	444
8.5	DS-CDMA 下行链路	447
8.5.1	下行速率控制	449
8.5.2	下行链路功率控制	450
8.5.3	性能分析	450
8.6	FH-CDMA 移动 Ad Hoc 网络	453
8.6.1	条件中断概率	455
8.6.2	速率自适应	455
8.6.3	调制限制下的区域频谱效率	455

8.6.4	优化算法	456
8.7	FH-CDMA 蜂窝网络	460
8.8	思考题	461
第9章	迭代信道估计、解调和译码	464
9.1	期望最大化算法	464
9.1.1	固定点迭代	469
9.2	直扩系统	470
9.2.1	编码、调制及信道估计	470
9.2.2	迭代接收机结构	471
9.2.3	EM 算法	473
9.2.4	接收机处有准确相位信息	476
9.2.5	接收机处无相位信息	477
9.2.6	盲 PACE 估计的折中	477
9.2.7	仿真结果	478
9.3	信息论导论	485
9.4	健壮跳频系统	487
9.4.1	系统模型	488
9.4.2	解调器度量	488
9.4.3	信道估计	491
9.4.4	调制指数的选择	494
9.4.5	部分频带干扰	496
9.4.6	异步多址接入干扰	500
9.5	习题	503
第10章	扩谱信号的检测	505
10.1	直扩信号的检测	505
10.2	能量检测器	509
10.2.1	瑞利衰落	513
10.2.2	噪声功率估计	516
10.2.3	其他实现问题	519
10.3	跳频信号的检测	522
10.4	信道化能量检测器	525
10.5	习题	531
附录 A:	高斯随机变量与过程	533