



国防电子信息技术丛书

Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems

电子战接收机与接收系统

[美] Richard A. Poisel 著
楼才义 等译 杨小牛 审校



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

电子战接收机与接收系统

Electronic Warfare Receivers
and Receiving Systems

[美] Richard A. Poisel 著

楼才义 等译

杨小牛 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书涉猎广泛、内容丰富,从基础的放大器、滤波器、混频器设计分析,到接收机的组成、各类接收机(模拟超外差接收机、压缩接收机、数字接收机、扩频接收机等)的架构都进行了讨论,还介绍了信号采样、数字滤波器及其性能,讨论了信号的调制解调,跳频、扩频、跳时信号的截获方法和特性,对通信信号的测向、通信电子战接收系统架构也进行了全面的论述。

本书深入浅出、娓娓道来,是通信信号侦察和干扰领域难得的好书,可作为从事电子对抗、通信侦察、频谱管理等领域研究的院校师生以及广大工程技术人员的重要参考资料。

© 2014 Artech House

685 Canton Street, Norwood, MA 02062

本书中文翻译版专有出版权由 Artech House Inc. 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2014-8170

图书在版编目(CIP)数据

电子战接收机与接收系统/(美)泊伊泽(Poisel, R. A.)著;楼才义等译.—北京:电子工业出版社,2016.1
(国防电子信息技术丛书)

书名原文: Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems

ISBN 978-7-121-27969-0

I. ①电… II. ①泊… ②楼… III. ①电子对抗-接收机 ②电子对抗-接收系统 IV. ①TN97

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 317998 号

策划编辑:竺南直

责任编辑:竺南直 特约编辑:郭 莉

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:33 字数:844.8 千字

版 次:2016 年 1 月第 1 版

印 次:2016 年 1 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

译者序

通信侦察是搜集辐射源参数、获取通信目标情报、实施电子支援、实现战场透明化、取得信息优势乃至进行作战效能评估的重要手段。要知彼知己,平时、战时都离不开信号的侦察和接收:平时通过侦察,积累信号参数,掌握敌电子装备部署、活动规律;战时通过侦察,发现目标、确定通联关系、展示电磁态势,引导电子或火力打击。

信号侦察包括对信号的检测、截获,参数估计、分析识别,信号的解调解码,辐射源的测向定位,等等。如何在复杂电磁环境下准确、快速地发现信号,生成并预测其活动态势,获取其各类情报是通信信号接收处理永恒的研究主题。

本书涉猎广泛、内容丰富,从基础的放大器、滤波器、混频器设计分析,到接收机的组成、各类接收机(模拟超外差接收机、压缩接收机、数字接收机、扩频接收机等)的架构讨论,还有数据采集、数字滤波、信号的调制解调,跳频、扩频、跳时信号的截获,通信信号的测向乃至通信电子战接收系统架构都进行了全面的讨论,本书深入浅出、娓娓道来,是通信信号侦察和干扰领域难得的一本好书,可作为从事通信侦察、电子对抗、频谱管理等行业广大工程技术人员和研发人员的重要参考资料。本书的翻译过程,对译者而言既是对新知识的学习,也是对以前大学所学知识的重新回顾和再梳理,受益匪浅。

本书共 20 章。第 1 章介绍了接收系统架构和战场侦察管理;第 2 章对通信信号的各种调制样式进行了讨论;第 3 章介绍了接收机的射频环节,重点讨论了低噪声放大问题;第 4 章介绍了扩展放大器带宽的一些方法;第 5 章介绍了混频器和振荡器;第 6 章介绍了中频放大器;第 7 章介绍了模拟滤波器的设计及特性;第 8、9、10 三章分别讨论了模拟窄带接收机、压缩接收机、数字接收机等三种接收机的结构及其性能分析;第 11 章介绍信号采样,并对多种 ADC 及其性能进行了讨论;第 12 章介绍了数字滤波器及其性能;第 13 章讨论了信号的数字解调方法;第 14 章对数模转换进行了介绍;第 15 章介绍直接数字下变频器;第 16 章对直接序列扩频、跳频、跳时方法和特性进行了介绍;第 17、18、19 三章分别讨论了直扩、跳频、跳时信号的截获方法;第 20 章中讨论了测向技术。

本书的作者 Richard A. Poisel 博士长期从事电子战的研究,是一位学术水平高、造诣深的电子战专家,其著作颇丰,出版了大量电子战专著,我们有幸翻译了包括本书在内的他的 3 部著作。

本书第 1、8、9、10 章由楼才义翻译;骆振兴翻译第 2、7 章;郭玉春翻译第 3 章;金大元翻译第 4 章;李新付翻译第 5、6 章;郑仕链翻译第 11、14、15 章;陈仕川翻译第 12、13 章;章军翻译 16、17、18、19 章;刘健翻译第 20 章。楼才义负责对全书的统稿,杨小牛院士对全书进行了仔细的审校。电子工业出版社竺南直博士为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此表示诚挚的感谢。

由于译者技术水平和翻译水平所限,对书中的有些术语难免把握不准,译著中肯定存在各种错误,敬请读者批评指正。

译者于嘉兴

2015 年 9 月

关于作者

Richard A. Poisel 于 1969 年在密尔沃基工程学院获得电气工程学士学位，并于 1971 年在普渡大学获得同一学科硕士学位。1971 年至 1973 年期间，他在军队服役。退役之后，他就读于威斯康星大学，于 1977 年获得电气与计算机工程专业博士。自 1977 年到 2004 年，他在同一家政府机构工作，该机构几经更名，现名为美军研究、开发、工程指挥、情报与信息战实验室。在 1993 ~ 1994 学年，Poisel 博士作为斯隆学员就读于麻省理工斯隆管理学院并获得工商管理硕士学位。Poisel 博士最初是一名研究人员，在 1997 ~ 1999 年期间担任实验室主任。1999 年，他被任命为首席科学家，并被委派至亚利桑那州 Ft. Huachuca 陆军情报中心，担任指挥组技术顾问。2004 年他从政府部门退休。在 2004 ~ 2011 年期间，作为一名高级工程研究员供职于在亚利桑那州图森的雷神公司导弹系统部。他现在是一名电子战应用工程的顾问。

Poisel 博士持有多项通信电子战领域的专利，并且是以下著作的作者，这些著作都由 Artech House 出版社出版：《通信电子战系统导论(第二版)》，2008；《现代通信干扰原理与技术(第二版)》，2011；《通信电子战系统目标获取》，2004；《通信电子战基础》，2008；《电子战目标定位方法(第二版)》，2012；《天线系统和电子战应用》，2012；《信息战和电子战系统》，2013。

前 言

接收系统可以说是电子战(EW)系统的核心。没有接收系统,电子战的基本目标也就无法实现。本书论述了组成接收系统的主要单元以及系统中的接收机。

第1章介绍接收系统架构,包括基本术语、系统功能和主要的系统性能指标。除介绍了非扩频数字通信外,也介绍了扩频通信。非扩频通信是我们感兴趣的大多数通信系统的基础。本章最后介绍了战场侦察管理。电子战信号侦察仅是众多信息侦察方法之一,对于了解在什么情况下电子战与其他手段配合是很有用的。

第2章涵盖了通信信号及其采用的调制系统,介绍了这些信号的数学表达式。着重介绍了数字技术,因为数字通信是现代扩频通信的基础。同时也介绍了随机调制,因为大多数现实通信信号至少会被热噪声所污染,从而使得通信信号实际上呈现出随机性,最起码是部分的随机性。本章还介绍了主要的频谱接入方法,包括较新的空分多址接入。本章结尾简要论述了两种最常用的信号滤波方法。

第3章起,我们将深入探讨接收机的主要组成单元。第3章专门讨论射频级,它是目标信号的进入点。重点讨论了低噪声放大器的噪声问题。热噪声对电子战系统来说有着特别的危害,因为我们感兴趣的目标信号通常非常微弱,这就要求低噪声放大器要把热噪声降到最低。尽管低噪声放大的方法非常多,我们只讨论采用双极结晶体管和金属氧化物半导体晶体管设计的低噪声放大器。还讨论了天线与接收机输入之间的失配效应。最后讨论了波段选择滤波器/预选滤波器以及为什么需要它们。

在电子战接收机中,其射频级低噪声放大器(LNA)的带宽应尽可能宽。通常这些接收机频段很宽并采用多级LNA。当然,放大器越多,接收机成本就越高,占用接收机的空间也越大,而且还会增加接收机的功耗,这通常又会增加额外费用。预选滤波器也需要宽带的,不过一般不需要像LNA那么宽。接收机中会经常采用亚倍频预选滤波器,也会用到相对窄带的(即10%的调谐频率)放大器。在第4章中介绍了增加放大器带宽的一些方法。

接收路径中的下一级通常就是混频器,我们将在第5章介绍混频器。讨论了混频器的基本参数及其局限性。除介绍了一些简单的混频器外,还讨论了芯片上系统(system-on-a-chip)接收机常用的吉尔伯特(Gilbert)混频器。本章最后还介绍了振荡器。本振对接收机性能的实现起着重要作用。

混频器级通常要驱动中频(IF)链路,这就是后续两章所要介绍的内容。第6章讨论了用作中频放大功能的射频放大器。第7章讨论模拟滤波器及其特性。滤波级通常是窄带的,其中心频率固定不变,且与接收机调谐的射频频率无关。

第8章讨论模拟窄带接收机。模拟窄带接收机一直以来是电子战接收机的主体。我们还讨论了超外差接收机及其属于同一类型的零差接收机(homodyne receiver),零差接收机其实是超外差接收机的一种特殊类型。虽然射频可调谐接收机(tuned radio frequency receiver)不是电子战接收机广泛使用的架构,本章中还是对其进行了简要描述。在某些场合下,还是可以使用调谐式接收机的,因为它们简单、成本低廉。

第9章讨论压缩接收机架构。压缩接收机是一种宽带接收机,它可以对频率捷变信号,如某类扩频信号,进行检测。压缩接收机通过与信号处理方法配合使用,就能用来截获这些信号。因此在这一章也介绍了快速信号处理模块及其主要性能参数。

另一类常用于处理扩频信号的宽带接收机就是数字接收机,我们从第10章开始介绍。第10章为后续五章的引导部分。在其后续五章中深入探讨数字接收机各个主题。第11章着重讨论信号采样及其如何采用模数转换器进行实现。我们还讨论了模数转换器的主要架构和性能参数。第12章介绍数字滤波器及其性能。第13章介绍信号的数字解调方法。我们有时需要(尽管不是总是需要)把信号从数字域转化到模拟域,第14章就介绍这样的器件及其主要架构。最后,在15章我们介绍直接数字下变频器。这种方法就是从由多个窄带信号组成的宽带信号中抽取出窄带信号。这也是现代电子战接收系统的一项重要需求。

第16章回顾了将窄带信号扩展为宽带信号的方法。讨论了直接序列扩频、跳频、跳时方法,并评估了它们的特性。

接下来三章讨论适用于这三种扩频信号的接收机架构。第17章讨论适用于直扩信号的两种典型架构。读完本章应该就会知道截获这种信号的难度了。第18章讨论了用于截获跳频信号的几种常用数字化接收机的架构以及压缩接收机的应用。跳频信号还是比较容易处理的。第19章阐述了用于跳时信号的接收机架构。跳时方法需要采用脉位调制以及很宽的带宽(几个GHz),因此,如果其功率不加以小心控制的话,就很容易与很多其他类型的通信发生干扰。正因为此,目前该方法仅局限于非常短距离链路(如个人领域网络)的应用。能处理该信号类型的接收机架构就是时间信道化辐射计,我们对此架构进行了讨论。

在最后一章(即第20章)中我们介绍了用于测向的接收机技术。讨论了最常用的信号处理架构;同时还讨论了电子战系统内、外部引入的大多数误差源。本章结尾部分简要讨论了采用压缩接收机对跳频信号进行测向的问题。

本书中有些符号是复用的。在类似这样一本涵盖主题广泛的书中,既要避免符号的重复使用,同时又要采用一些标准符号(例如 f 既表示频率又表示噪声系数)还是非常困难的。尽管我们努力减少这种情况,但有些符号复用还是无法避免。这种情况下,希望读者能通过上下文理解这些符号的含义。

任何因授权使用或疏忽造成的错误,均由作者负责,并非常欢迎提出建设性的反馈意见。

目 录

第 1 章 接收系统和接收系统结构	1
1.1 引言	1
1.2 电子支援系统	1
1.2.1 电子支援	1
1.2.2 指挥和控制	2
1.3 电磁波频谱	2
1.4 接收系统结构	3
1.4.1 基本的接收系统模型	3
1.5 监听接收机(Monitor receiver)	6
1.5.1 超外差接收机的原理	6
1.6 搜索接收机结构	7
1.6.1 窄带搜索接收机	7
1.6.2 压缩接收机	8
1.6.3 数字变换接收机	10
1.6.4 接收机考虑	10
1.7 关键系统参数	11
1.7.1 噪声系数	11
1.7.2 灵敏度	11
1.7.3 选择性	12
1.7.4 动态范围	12
1.7.5 其他重要参数	12
1.8 扩频	13
1.8.1 FHSS	13
1.8.2 DSSS	13
1.8.3 THSS	13
1.9 侦察管理(Collection Management)	14
1.9.1 侦察管理过程	14
1.10 结束语	16
附录 1. A 侦察管理过程输出产品	16
1. A.1 设备评估工作表	17
1. A.2 情报同步矩阵	18
参考文献	18
第 2 章 信号与调制系统	19
2.1 引言	19
2.2 信号表示	19

2.3	复信号和系统	20
2.3.1	引言	20
2.3.2	基本概念和定义	20
2.3.3	解析信号和 Hilbert 变换	21
2.3.4	频率变换和混频	23
2.3.5	复信号和采样	25
2.3.6	小结	26
2.4	系统定义	26
2.5	调制	28
2.5.1	模拟调制	28
2.5.2	现代数字调制	35
2.6	随机调制	43
2.6.1	稳态过程	44
2.6.2	随机调制	47
2.6.3	小结	54
2.7	接入方法	54
2.7.1	TDMA	54
2.7.2	FDMA	55
2.7.3	CDMA	55
2.7.4	SDMA	57
2.8	脉冲成型滤波器	57
2.8.1	矩形脉冲	58
2.8.2	成型脉冲	58
2.9	结束语	61
	参考文献	62
第3章	射频级	63
3.1	引言	63
3.2	折算至输入的归一化附加噪声	64
3.3	噪声因子/噪声系数	65
3.4	低噪声放大器	67
3.4.1	概述	67
3.4.2	最小噪声因子	68
3.4.3	LNA 增益	70
3.4.4	BJT 低噪声放大器	70
3.4.5	MOSFET 低噪声放大器	72
3.4.6	输入匹配	75
3.4.7	LNA 稳定性	86
3.4.8	LNA 非线性模型	89
3.5	输入变压器降噪	91
3.6	带选滤波/预选滤波器	92

3.6.1 修平滤波器	93
3.7 结论	93
参考文献	94
第4章 小信号放大器的带宽扩展	95
4.1 引言	95
4.2 并联峰化(shunt Peaking)	95
4.3 输入输出匹配	97
4.3.1 跨阻放大器的带宽扩展	97
4.3.2 带宽扩展的限制	98
4.4 有损匹配	102
4.4.1 性能参数	102
4.4.2 实际应用分析	105
4.4.3 小结	106
4.5 反馈	106
4.5.1 串-并联反馈	106
4.5.2 并联反馈	108
4.5.3 带宽扩展	108
4.6 平衡放大器	108
4.6.1 耦合器	110
4.7 分布式放大器	115
4.8 结束语	117
参考文献	117
第5章 射频混频器与混频	119
5.1 引言	119
5.2 射频混频器	119
5.2.1 引言	119
5.2.2 非线性混频器	120
5.2.3 模拟混频	121
5.2.4 大信号混频性能	121
5.2.5 开关或取样混频器	125
5.2.6 无源混频器	130
5.2.7 部分有源混频器	133
5.2.8 隔离度	138
5.2.9 转换增益	138
5.2.10 混频器的噪声	139
5.2.11 镜频抑制滤波器	139
5.2.12 小结	148
5.3 本地振荡器	148
5.3.1 反馈的特性	148

5.3.2	振荡器基本类型	151
5.3.3	晶体振荡器	152
5.3.4	微机电振荡器	156
5.3.5	锁相环路	158
5.3.6	频率合成器	162
5.3.7	振荡器的相位噪声	166
5.3.8	振荡器的稳定性	171
5.4	结束语	172
	参考文献	173
第6章	中频放大器	174
6.1	引言	174
6.2	放大器的输入输出阻抗和增益	174
6.3	射频放大器	176
6.3.1	电子战射频放大器分析	176
6.3.2	三极管中频放大器	181
6.3.3	MOSFET 高频放大器	181
6.3.4	射频放大器的频率响应	182
6.3.5	微波电子管	184
6.4	变压器耦合	184
6.5	自动增益控制	186
6.5.1	引言	186
6.5.2	VGA 类型	186
6.5.3	环路动态	187
6.5.4	检波器类型	188
6.5.5	检波器的工作电平	190
6.6	小结	190
	参考文献	190
第7章	中频滤波器	191
7.1	引言	191
7.2	滤波器和信号	191
7.3	基本的滤波器类型	192
7.3.1	传输函数	193
7.3.2	砖墙滤波器(Brick-Wall Filter)	197
7.3.3	带通	197
7.3.4	陷波或带阻	198
7.3.5	低通	199
7.3.6	高通	200
7.3.7	全通或相移	200
7.3.8	较高阶数滤波器	201

7.4 滤波器近似	203
7.4.1 引言	203
7.4.2 巴特沃斯(Butterworth)滤波器	205
7.4.3 切比雪夫滤波器(Chebyshev filter)	206
7.4.4 贝塞尔(Bessel)滤波器	208
7.4.5 椭圆滤波器(考尔滤波器)	210
7.5 实现滤波器的方法	211
7.5.1 无源滤波器	211
7.5.2 声表面波滤波器	220
7.5.3 晶体滤波器	223
7.5.4 陶瓷射频和中频滤波器	226
7.5.5 微机电系统(MEMS)射频滤波器	228
7.6 结束语	230
参考文献	230
第8章 窄带接收机	231
8.1 引言	231
8.2 超外差接收机	231
8.2.1 超外差接收机的历史	232
8.2.2 混频和超外差接收机	233
8.2.3 超外差接收机的镜像	233
8.2.4 IF 频率	234
8.2.5 超外差接收机框图	234
8.3 零差(零中频)接收机	238
8.3.1 DCR 的原理	238
8.3.2 DCR 中 DC 偏移综述	239
8.3.3 直接变频接收机中的噪声	241
8.4 射频可调谐接收机	241
8.5 结束语	242
参考文献	242
第9章 压缩接收机	244
9.1 引言	244
9.2 压缩接收机的结构	244
9.2.1 C-M-C 和 M-C-M 结构	245
9.3 CxRx 的基本工作原理	246
9.3.1 M(s)-C(l)-M 结构	246
9.4 色散延迟线(Dispersive Delay Lines, DDL)	248
9.4.1 实际 SAW 器件的限制	249
9.5 M-C CxRx 工作原理	250
9.5.1 扫描本振	252

9.5.2	频率分辨率	253
9.5.3	频率精度	254
9.5.4	灵敏度和压缩时间	255
9.5.5	同时出现信号的检测	256
9.5.6	CxRx 响应	256
9.6	C-M-C chirp 变换结构	260
9.7	结束语	261
	参考文献	261
第 10 章	数字化接收机综述	263
10.1	引言	263
10.2	数字化接收机结构	263
10.2.1	窄带数字化接收机	264
10.2.2	RF 数字化结构	265
10.2.3	IF 采样结构	265
10.2.4	电子战数字化接收机	265
10.3	数字化接收机的技术驱动	266
10.3.1	模数转换器	266
10.3.2	数字信号处理器	266
10.4	RF/IF 数字信号处理简介	267
10.4.1	频域模糊	267
10.4.2	正交信号	269
10.4.3	小结	272
10.5	数字化 EW 接收机	273
10.5.1	引言	273
10.5.2	单信号与多信号	273
10.5.3	采用数字化接收机的好处	274
10.5.4	接收机性能预计	277
10.5.5	有效噪声功率	277
10.5.6	级联噪声系数	278
10.5.7	噪声系数和 ADC	278
10.5.8	变换增益和灵敏度	279
10.5.9	ADC 虚假信号和加扰	280
10.5.10	三阶截点	281
10.5.11	ADC 的时钟抖动	282
10.5.12	相位噪声	283
10.5.13	小结	284
10.6	增益和相位不平衡	284
10.7	结束语	285
	参考文献	286

第 11 章 采样和模数转换器	287
11.1 引言	287
11.2 宽带接收机	287
11.2.1 信道化	288
11.3 采样方法和模拟滤波	289
11.3.1 Nyquist 采样	290
11.3.2 带通采样	292
11.4 量化噪声、失真和接收机噪声的影响	295
11.4.1 引言	295
11.4.2 ADC 传输函数	296
11.4.3 输入导致的噪声	296
11.4.4 理论信噪比	296
11.4.5 实际 ADC 的指标	297
11.4.6 ADC 噪声	297
11.4.7 无杂散动态范围	304
11.4.8 噪声功率比	306
11.5 Flash ADC	307
11.5.1 Flash ADC 结构	307
11.5.2 Sparkle 码	307
11.5.3 亚稳性 (metastability)	308
11.5.4 输入信号频率依赖	308
11.6 Σ - Δ ADC	309
11.6.1 引言	309
11.6.2 Σ - Δ ADC 工作过程	309
11.6.3 高阶环考虑因素	311
11.6.4 多比特 Σ - Δ 转换器	312
11.6.5 带通 Σ - Δ 转换器	313
11.7 Flash ADC 与其他 ADC 结构的对比	314
11.7.1 Flash ADC 与 SAR ADC 对比	314
11.7.2 Flash ADC 与流水线式 ADC 对比	314
11.7.3 Flash ADC 与集成 ADC 对比	315
11.7.4 Flash ADC 与 Σ - Δ ADC 对比	316
11.7.5 Flash ADC 结构折中	316
11.7.6 Flash 转换器的特征	317
11.7.7 小结	317
11.8 其他采样和 ADC 考虑因素	317
11.8.1 ADC 实现的难易程度	317
11.8.2 线性	317
11.8.3 功耗、电路复杂度、芯片面积以及可重构性	318
11.9 结束语	318

参考文献	318
第 12 章 数字滤波	320
12.1 引言	320
12.1.1 数字滤波器优点	321
12.1.2 数字滤波器缺点	321
12.2 数字滤波器的原理	322
12.3 简单的数字滤波器	322
12.3.1 数字滤波器阶数	323
12.3.2 数字滤波器系数	324
12.4 递归和非递归滤波器	325
12.4.1 冲激响应	325
12.4.2 低通 FIR 滤波器	326
12.4.3 IIR 数字滤波器的阶数	328
12.4.4 递归数字滤波器举例	329
12.4.5 IIR 数字滤波器系数	329
12.5 数字滤波器传输函数	330
12.5.1 数字滤波器的频率响应	331
12.6 带通多速率处理与 IQ 信号	333
12.6.1 复信号的抽取或下采样处理	333
12.6.2 复信号的内插或上采样处理	334
12.6.3 高效的多相结构	335
12.7 希尔伯特变换和延迟	338
12.7.1 延迟处理的滤波效果	339
12.8 结束语	343
参考文献	344
第 13 章 数字解调	345
13.1 引言	345
13.2 数字 I/Q 解调	345
13.2.1 概述	345
13.2.2 I/Q 解调	346
13.3 直接中频数字解调器	347
13.3.1 无需数字信号处理器的数字信号处理	347
13.3.2 I/Q 采样	348
13.3.3 矢量表示	351
13.3.4 欠采样	351
13.4 直接中频处理单元	352
13.4.1 A/D 转换器/中频采样器	352
13.4.2 数字中频采样到 I/Q 矢量的转换	352
13.4.3 I/Q 矢量到相位的转换	353

13.4.4	矢量幅度: AM 检波	354
13.4.5	小结	354
13.5	I/Q 不平衡补偿	354
13.5.1	数字不平衡补偿的基带信号模型	354
13.5.2	基于自适应干扰抵消的补偿	355
13.5.3	小结	356
13.5.4	仿真验证	356
13.6	结束语	357
	参考文献	357
第 14 章	数模转换器	358
14.1	引言	358
14.2	数模转换器体系结构	359
14.2.1	DAC 传输函数	359
14.2.2	串列式 DAC	359
14.2.3	全译码 DAC	362
14.2.4	时间参考分压器	366
14.2.5	过采样 DAC	366
14.2.6	$\Sigma\text{-}\Delta$ DAC	367
14.2.7	电流电压转换器	368
14.3	DAC 误差源	369
14.3.1	静态误差源	369
14.3.2	动态误差源	370
14.4	重构滤波器	373
14.5	结束语	374
附录 14. A	半导体电流源和开关	374
14. A.1	半导体电流源	374
14. A.2	半导体开关	375
14. A.3	作为电流源和开关的晶体管	376
	参考文献	376
第 15 章	直接数字下变频器	378
15.1	引言	378
15.2	数字接收机	378
15.3	数字下变频器	381
15.3.1	引言	381
15.3.2	数字下变频器	382
15.4	多相滤波器组	389
15.4.1	引言	389
15.4.2	多相带宽、频谱间隔和输出采样率	390
15.4.3	计算复杂度	390

15.5 结束语	392
附录 15.A 直接数字合成	392
15.A.1 相位截断	392
15.A.2 直接数字合成	393
参考文献	395
第 16 章 扩频技术	396
16.1 引言	396
16.2 直接序列扩频(DSSS)回顾	396
16.2.1 DSSS 基本原理	397
16.2.2 调制和解调	399
16.2.3 编码技术	400
16.2.4 远近问题	400
16.3 跳频扩频回顾	401
16.3.1 FHSS 原理	401
16.3.2 调制	403
16.3.3 编码	403
16.3.4 快跳频相关问题	403
16.3.5 远近问题	404
16.4 跳时扩频	404
16.4.1 引言	404
16.4.2 超宽带系统	404
16.4.3 调制方式	406
16.4.4 超宽带脉位调制	406
16.4.5 干扰抑制和处理增益	408
16.4.6 多径和传播	408
16.5 扩频的优点	409
16.6 结束语	410
参考文献	410
第 17 章 截获直接序列扩频信号的接收机	412
17.1 引言	412
17.2 两种接收机的概述	412
17.2.1 特征分解技术	412
17.2.2 谱范数最大化	413
17.3 直接序列扩频接收机的特征分解	413
17.3.1 信号模型	413
17.3.2 估计符号持续时间	414
17.3.3 扩频序列盲估计	414
17.3.4 验证和确认	416
17.3.5 小结	417