

# 宽带数字接收机

Digital Techniques for Wideband Receivers  
(Second Edition)

(美) James Tsui 著

杨小牛 陆安南 金 飏 译



.142



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[http:// www.phei.com.cn](http://www.phei.com.cn)

## 内 容 简 介

本书分为 16 章,第 1 章为引言,第 2 章简要介绍 EW 方面的知识。对于宽带接收机设计者感兴趣的傅里叶变换、离散傅里叶变换以及某些与之相关的课题在第 3、4 和 5 章中介绍。第 6 章到第 8 章主要讨论接收机硬件技术,包括 ADC 及其对接收机性能的影响、以 ADC 为输出的接收机前端设计和同相正交变换器设计。第 9 章讨论虚警概率和检测概率。第 10 章介绍用于频率测量的相位测量法和过零点测量法。第 11 章到第 14 章讨论与接收机设计密切相关的各种方法,包括频率信道化技术、EW 接收机的简单设计方法、在信道化后如何进行信号处理的可能方法、有关高频率分辨率技术的讨论等。第 15 章介绍了到达角测量(测向)技术。最后,在第 16 章讨论 EW 接收机的评估测试。

本书的读者对象为电子工程专业高年级学生,以及电子战和通信领域的研究人员。

Original edition Copyright © 2001 Artech House, Inc.

685 Canton Street, Norwood, MA02062, U. S. A. All rights reserved.

Authorized translation from English language edition published by Artech House, Inc.

本书中文版专有翻译出版权由美国 Artech House, Inc. 授予电子工业出版社出版,该专有出版权受法律保护。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

宽带数字接收机/(美)徐(Tsui, J.)著;杨小牛,陆安南,金鸫译. —北京:电子工业出版社,2002.10  
书名原文:Digital Techniques for Wideband Receivers(Second Edition)  
ISBN 7-5053-7665-9

I. 宽 … II. ①徐…②杨…③陆…④金… III. 宽带通信系统:数字通信系统—通信接收机  
IV. TN915.142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 071513 号

责任编辑:竺南直 李 冰

印 刷:北京市增富印刷有限责任公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:24.25 字数:616 千字

版 次:2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:48.00 元

版权贸易合同登记号 图字:01-2002-0546

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

## 译者序

21 世纪已进入数字化的时代，数字地球、数字化战场、数字化部队、数字家电（数字电视、数字冰箱、数字空调）等等新概念应运而生，我们正在走进一个数字化的王国。

什么是数字？用计算机术语来表示就是“0”、“1”比特。而所谓的数字化就是用“0”、“1”比特（二进制数字）来处理各种事物（信息）。数字化的处理方法使得对各种信息（事物）的处理更具有灵活性、准确性和功能可扩展性，对数字化的信息进行存储、传输、处理也更加方便、快捷和可靠。所以，基于数字化技术的信息处理是必然的发展趋势。

在无线电技术（比如通信、雷达、电子战、遥控遥测等）领域，无线电系统所处理的主要对象是电磁波。无线电系统中的接收天线首先把电磁波转化为电信号，然后馈入到接收系统进行必要的分析和处理。在 20 世纪 70 年代以前，对电磁信号的处理主要以模拟处理方法为主，包含有滤波、放大、混频、检波等各种模拟处理环节。模拟处理方法不仅缺乏灵活性、可扩展性，而且每一环节都会不同程度地引入各种非线性失真，导致接收系统性能下降，功能降低。80 年代以后，随着微电子技术的迅猛发展，数字信号处理技术开始获得广泛应用，并逐步显现出模拟处理方式所无法达到的优越性。但在 90 年代中期以前，数字化信号处理主要还是在相对较窄的中频带宽上进行，比如对于雷达系统可能就是几兆赫到几十兆赫，而通信系统处理的频带就更窄，一般为几十千赫到几百千赫。这不仅受 A/D（模拟-数字转换）器件采样速度的限制，也受后续数字信号处理器件（DSP）所能达到的处理速度的限制。为了迎合窄带处理这样一种要求，在 A/D 前就不得不进行多次模拟频率变换，把射频信号变换为带宽相对较窄的中频信号。随着人类对频谱带宽需求的不断增大，这样一种窄带数字处理方式仍然无法满足越来越高的技术要求。从 90 年代中期以后，宽带数字信号处理技术开始受到高度重视，各种商品化的宽带、高速信号处理器件也在市场上大量涌现，为宽带数字化技术的工程实现奠定了基础。

本书就是专门介绍宽带接收机数字化技术的专著，对宽带数字化接收机，特别是电子战数字化接收机的技术要求、模拟接收前端、高速 A/D 变换、数字信道化技术、相位测量与过零检测、到达角测量与高分辨率谱估计、接收机测量技术以及包括傅里叶变换、离散傅里叶变换（DFT）、快速傅里叶变换（FFT）、卷积等各种信号处理算法进行了详细的讨论和介绍。本书介绍的宽带数字化接收机虽然是以电子战为应用背景来讨论的，但其中所涉及的基础理论、关键技术和各种信号处理算法也同样适用于无线通信等其他领域，是一本很值得向有关工程技术人员和大专院校高年级本科生、研究生推荐的专业书籍和教学参考书。

本书第 1~5 章和前言部分由杨小牛翻译，第 9 章和第 14~16 章由陆安南翻译，第 6~8 章由金飏翻译，楼才义翻译了第 10、11 章，李新付翻译了第 12、13 章，孔宪正对全书进行了仔细审校。由于译者水平有限，对书中的有些技术术语难免把握不准，译著中肯定会存在各种错误，敬请读者批评指正。

译者于 2002 年 9 月 15 日

# 前 言

本书主要介绍与宽带接收机设计密切相关的数字信号处理方法。重点讨论其实用技术而不是其理论。由于接收机设计的主要目标是准实时地处理输入数据，所以这些处理方法的计算速度是我们最为关心的问题。

数字信号处理已经广泛应用于很多技术领域。以前的电子战（EW）接收机主要是在晶体检测器之后采用数字信号处理，而模-数变换器（ADC）技术的发展开创了接收机设计的新纪元。ADC 取代晶体检测器，这使以前采用检测后处理方法所丢失的有用信息得以保留下来。

电子战的要求和通信的要求往往不同，EW 接收机需要非常宽的带宽，而通信接收机的带宽相对较窄。然而，最近几年来，这两个领域的技术要求已经变得越来越一致了，在这两大类型的系统中，最重要的要求都是要有宽的输入带宽覆盖范围和大的动态范围。所以，以前只在 EW 接收机中考虑的许多技术现在对于通信系统也是实用的。

本书分为 16 章，第 1 章为引言，第 2 章和第 16 章讨论与电子战相关的问题，其中第 2 章简要介绍 EW 方面的知识，第 16 章讨论 EW 接收机的评估测试。宽带接收机设计者尤其感兴趣的傅里叶变换、离散傅里叶变换以及与之相关的课题在第 3, 4 和 5 章中介绍。第 6 章到第 8 章主要讨论接收机硬件技术，其中第 6 章研究 ADC 及其对接收机性能的影响，第 7 章介绍以 ADC 为输出的接收机前端的设计，第 8 章讨论同相正交变换器的设计。虚警概率和检测概率在第 9 章进行讨论。第 10 章介绍用于频率测量的相位测量法和过零点测量法。第 11 章到第 14 章讨论与接收机设计密切相关的各种方法，其中第 11 章介绍频率信道化技术，第 12 章介绍 EW 接收机的简单设计方法，第 13 章则主要讨论在信道化后进行信号处理的方法，有关高频率分辨率技术的讨论包含在第 14 章中。最后，第 15 章介绍了到达角测量（测向）技术。

本书的读者对象为高等院校电子工程专业高年级学生，也可供从事电子战和通信领域工作的研究人员阅读。为了更容易地理解这些内容，书中给出了许多例子，另外还包括了很多计算机程序，这有助于读者进一步搞清楚书中的概念。

我就本书与莱特国立大学的 William McCormick 博士，Arnab Shaw 博士以及空军实验室的 Richard Sanderson 博士进行了很多有意义的讨论，在些深表感激。特别感谢两位工程师：空军研究室的 David Sharpin 先生和系统研究实验室的 Timothy Fields 先生，他们给本书提供了技术方面的探讨。空军研究室的 Rudy Shan 先生，Anthony White 先生，Emil Martinsek 先生，William Moore 先生和 Paul Hadorn 博士给了我很大鼓励。我还要感谢我的同事们：空军实验室的 Robert Davis 先生，Joseph Caschera 先生，Debbie Ables 小姐，N.Cholas Pequignot 先生，James Hedgt 先生，Daniel Zahirniak 上尉，Jason Shtrax 少尉，Daniel Richards 上尉，Ed Culppper 先生，以及系统研究室的 James McCartney 先生，Jerry Bash 先生，Marlz Thompson 先生，Jeff Wagenbalh 先生。

最后，很重要的，我想感谢我的夫人 Susan，她对我花大量时间在这本书上，给予了支持与理解。

James Tsui

# 目 录

第 1 章 引言 .....	(1)
1.1 宽带系统 .....	(1)
1.2 数字方法 .....	(1)
1.3 EW 接收机研发中遇到的主要问题 .....	(3)
1.4 本书的内容安排 .....	(3)
1.5 特别说明 .....	(4)
参考文献 .....	(4)
第 2 章 电子战接收机的需求与特性 .....	(5)
2.1 引言 .....	(5)
2.2 电子战简介 .....	(5)
2.3 侦察接收机和通信接收机之间的区别 .....	(6)
2.4 EW 接收机面临的信号环境 .....	(7)
2.5 对 EW 接收机的要求 .....	(8)
2.6 EW 接收机所测量的参数 .....	(9)
2.7 频率信息 .....	(10)
2.8 AOA 信息 .....	(12)
2.9 EW 接收机的输出 .....	(12)
2.10 模拟 EW 接收机概述 .....	(13)
2.11 瞬时频率测量 (IFM) 接收机 .....	(14)
2.12 信道化接收机 .....	(15)
2.13 布莱格接收机 .....	(16)
2.14 压缩 (微扫) 接收机 .....	(16)
2.15 数字接收机 .....	(17)
2.16 EW 接收机的特性和性能 .....	(18)
2.16.1 单信号 .....	(19)
2.16.2 两个同时到达信号 .....	(20)
2.17 EW 接收机的发展趋势 .....	(20)
2.17.1 需解决的理论问题 .....	(20)
2.17.2 队列 (Queuing) 接收机 .....	(20)
2.17.3 用于 AOA 测量的压缩接收机 .....	(21)
2.17.4 信道化 IFM 接收机 .....	(21)
2.17.5 数字化 EW 接收机 .....	(21)
2.18 电子战处理机 .....	(22)
2.18.1 去参差 .....	(22)

2.18.2	PRI 产生	(23)
2.18.3	雷达识别	(24)
2.18.4	跟踪	(24)
2.18.5	重访问	(24)
2.19	EW 接收机设计目标	(24)
2.20	总结	(25)
	参考文献	(25)
<b>第 3 章</b>	<b>傅里叶变换和卷积</b>	<b>(29)</b>
3.1	引言	(29)
3.2	傅里叶变换	(29)
3.3	冲击函数	(31)
3.4	傅里叶变换的性质	(32)
3.4.1	线性性质	(32)
3.4.2	奇偶函数	(32)
3.4.3	对偶性	(33)
3.4.4	尺度特性	(34)
3.4.5	时移特性	(35)
3.4.6	频移特性	(35)
3.4.7	导数特性	(35)
3.4.8	积分特性	(36)
3.5	傅里叶级数	(36)
3.6	梳状函数	(37)
3.7	卷积	(39)
3.8	帕萨瓦尔 (Parseval) 定理	(42)
3.9	举例	(42)
3.10	总结	(50)
	参考文献	(53)
<b>第 4 章</b>	<b>离散傅里叶变换</b>	<b>(55)</b>
4.1	引言	(55)
4.2	信号的数字化	(55)
4.3	离散傅里叶变换 (DFT) 的图形描述	(56)
4.4	离散傅里叶变换解析法	(57)
4.5	离散傅里叶变换的性质	(58)
4.5.1	频域带宽限制	(59)
4.5.2	非匹配的时间间隔	(59)
4.5.3	对实数据的混叠效应	(61)
4.6	窗函数	(62)
4.6.1	矩形窗	(63)
4.6.2	高斯窗	(64)

4.6.3	按 $\alpha$ 阶滚降的余弦窗 .....	(65)
4.6.4	广义汉明 (Hamming) 窗 .....	(66)
4.7	快速傅里叶变换 (FFT) .....	(67)
4.8	在接收机中使用 DFT 比使用 FFT 可能具有的优越性 .....	(71)
4.8.1	初始数据累积 .....	(71)
4.8.2	滑动 DFT .....	(72)
4.9	周期图 .....	(72)
4.10	平均周期图 .....	(73)
	参考文献 .....	(75)
<b>第 5 章</b>	<b>与傅里叶变换相关的运算 .....</b>	<b>(77)</b>
5.1	引言 .....	(77)
5.2	补零技术 .....	(77)
5.3	周期和线性卷积 .....	(79)
5.4	矩形窗的峰值位置估计 .....	(82)
5.5	汉宁窗的峰值估计 .....	(84)
5.6	通过迭代运算的峰值估计 .....	(86)
5.7	基于快速傅里叶变换的实际频率确定 .....	(87)
5.8	用复数 FFT 计算实输入 .....	(88)
5.9	自相关 .....	(90)
5.10	自相关 (Blackman-Tukey) 谱估计 .....	(91)
5.11	FFT 在基于自相关函数的谱估计中的应用 .....	(92)
5.12	欠奈奎斯特采样的基本概念 .....	(94)
5.13	欠奈奎斯特采样系统中的相位关系 .....	(96)
5.14	欠奈奎斯特采样结构存在的问题和解决方法 .....	(98)
5.15	通过抽取的离散傅里叶变换 .....	(100)
5.16	抽取法在 EW 接收机中的应用 .....	(102)
5.17	简化的抽取方法 .....	(103)
	参考文献 .....	(104)
<b>第 6 章</b>	<b>模-数变换器 .....</b>	<b>(106)</b>
6.1	引言 .....	(106)
6.2	通过折叠技术的 ADC .....	(106)
6.3	通过 $\Sigma$ - $\Delta$ 调制的 ADC .....	(107)
6.4	基本的采样保持电路 .....	(110)
6.5	基本的 ADC 性能和输入带宽 .....	(111)
6.6	ADC 的最大和最小输入信号 .....	(112)
6.7	理想 ADC 的量化噪声 .....	(113)
6.8	由处理带宽和抖动效应决定的噪声电平 .....	(114)
6.9	虚假响应 .....	(115)
6.10	虚假幅度的分析 .....	(117)

6.11	关于虚假幅度的进一步讨论	(121)
6.12	ADC 噪声的影响	(123)
6.13	采样窗口抖动的影响	(125)
6.14	ADC 的直方图测试	(127)
6.15	ADC 的正弦波曲线拟合测试	(129)
6.16	通过 FFT 运算测试 ADC	(130)
6.17	ADC 的要求	(138)
	参考文献	(139)
<b>第 7 章</b>	<b>放大器和模-数变换器的接口</b>	<b>(144)</b>
7.1	引言	(144)
7.2	关键元器件的选择	(144)
7.3	符号	(145)
7.4	模拟接收机和数字接收机的灵敏度比较	(146)
7.5	噪声系数和三阶截点	(146)
7.6	级联放大器特性	(148)
7.7	模-数变换器	(151)
7.8	放大器和模-数变换器组合的噪声系数	(152)
7.9	放大器和模-数变换器的接口	(152)
7.10	M 和 M' 的意义	(154)
7.11	计算机程序及运行结果	(154)
7.12	设计举例	(156)
7.13	实验结果	(157)
	7.13.1 噪声系数测量	(157)
	7.13.2 动态范围测量	(158)
	参考文献	(161)
<b>第 8 章</b>	<b>下变频器</b>	<b>(165)</b>
8.1	引言	(165)
8.2	基带接收机的频率选择	(165)
8.3	频率变换	(166)
8.4	同相(I)和正交(Q)信道变换	(168)
8.5	I 信道与 Q 信道之间的不平衡性	(169)
8.6	模拟 I-Q 下变频器	(172)
8.7	用数字方法产生 I-Q 信道	(174)
8.8	希尔伯特变换	(174)
8.9	离散希尔伯特变换	(176)
8.10	离散希尔伯特变换举例	(178)
8.11	采用特殊采样方案的窄带 I-Q 信道	(180)
8.12	采用特殊采样方案的宽带 I-Q 信道	(180)
8.13	用于宽带数字化 I-Q 信道的滤波器硬件设计	(182)



8.14	I-Q 信道不平衡性的数字校正 .....	(184)
	参考文献 .....	(185)
<b>第 9 章</b>	<b>灵敏度与信号检测 .....</b>	<b>(188)</b>
9.1	引言 .....	(188)
9.2	电子战接收机的检测方法 .....	(188)
9.3	数字 EW 接收机潜在的检测优点 .....	(189)
9.3.1	频域检测 .....	(189)
9.3.2	时域检测 .....	(190)
9.4	一个数据样本的虚警时间和虚警概率 .....	(190)
9.5	对一个数据样本设定门限 .....	(191)
9.6	单样本检测的检测概率 .....	(192)
9.7	基于多个数据样本点的检测 .....	(193)
9.8	多样本检测方案 (表决法) .....	(193)
9.9	概率密度函数和特征函数 .....	(194)
9.10	用平方律检测器对样本求和的概率密度函数 .....	(195)
9.11	基于取总和的多样本检测 .....	(196)
9.12	单样本检测的例子 .....	(197)
9.13	多样本 (表决法) 检测的一个例子 .....	(199)
9.14	门限电平的选择 .....	(200)
9.15	优化门限选择 .....	(202)
9.16	一个 $N$ 样本检测的例子 (总和法) .....	(203)
9.17	频域检测入门 .....	(204)
9.18	建议的频域检测方法 .....	(205)
9.19	频域中的虚警概率 .....	(206)
9.20	频域检测中的输入信号情况 .....	(207)
9.21	频域检测概率 .....	(208)
9.22	频域检测的例子 .....	(210)
9.23	频域检测注释 .....	(211)
	参考文献 .....	(211)
<b>第 10 章</b>	<b>相位测量和过零检测法 .....</b>	<b>(219)</b>
10.1	引言 .....	(219)
10.2	数字相位测量 .....	(219)
10.3	角频率和量化电平 .....	(220)
10.4	相位测量法和 FFT 结果的比较 .....	(222)
10.5	相位测量方案的应用 .....	(222)
10.6	同时存在两个信号的情况分析 .....	(223)
10.7	两个信号的频率测量 .....	(225)
10.8	用过零检测法测量单频信号 .....	(226)
10.9	单信号过零检测中的性能恶化与校正 .....	(228)

10.10	简化的单信号过零计算 .....	(229)
10.11	单频过零法的实验结果 .....	(231)
10.12	在相参多普勒雷达频率测量中的应用 .....	(233)
10.13	用于普通测频中的过零检测 .....	(234)
10.14	过零检测谱分析的基本定义 .....	(235)
10.15	产生实数过零点 .....	(236)
10.16	计算过零检测谱分析的系数 .....	(237)
10.17	实现过零检测谱分析法可能的结构 .....	(239)
	参考文献 .....	(240)
<b>第 11 章</b>	<b>频域信道化 .....</b>	<b>(242)</b>
11.1	引言 .....	(242)
11.2	滤波器组 .....	(242)
11.3	FFT 运算和卷积运算 .....	(243)
11.4	FFT 运算中的输入数据重叠 .....	(244)
11.5	FFT 运算的数据输出速率 .....	(246)
11.6	抽取和内插 .....	(248)
11.7	抽取和内插对离散傅里叶变换的影响 .....	(249)
11.8	滤波器组设计方法 .....	(251)
11.9	频域抽取 .....	(251)
11.10	由抽取 FFT 得到的滤波器特性 .....	(254)
11.11	用加权函数展宽输出滤波器 .....	(254)
11.12	改变输出采样速率 .....	(256)
11.13	用多相滤波器信道化 .....	(256)
11.14	多相滤波器运算 .....	(258)
11.15	滤波器设计 .....	(259)
	参考文献 .....	(260)
<b>第 12 章</b>	<b>单比特接收机 .....</b>	<b>(261)</b>
12.1	引言 .....	(261)
12.2	单比特接收机的原始概念 .....	(261)
12.3	单比特接收机思想 .....	(262)
12.4	设计准则 .....	(263)
12.5	接收机的组成 .....	(264)
12.6	射频通道, ADC 和多路输出选择器 .....	(264)
12.7	基本 FFT 芯片的设计 .....	(266)
12.8	频率编码器的设计 .....	(267)
12.9	门限的选择 .....	(268)
12.10	单比特接收机的基本性能 .....	(270)
12.11	改进措施 .....	(272)
12.12	芯片的设计 .....	(274)

参考文献 .....	(274)
<b>第 13 章 频率信道化后的处理方法 .....</b>	<b>(275)</b>
13.1 引言 .....	(275)
13.2 数字化途径的基本考虑 .....	(275)
13.3 滤波器形状的选择 .....	(276)
13.4 模拟滤波器组后接相位比较器 .....	(278)
13.5 单比特接收机后接相位比较器 .....	(279)
13.6 数字滤波器后接相位比较器 .....	(281)
13.7 模拟滤波器后接单比特接收机 .....	(282)
13.8 数字滤波器后接单比特接收机的情况 .....	(285)
13.9 通过 2 倍内插来增加输出数据采样速率 .....	(286)
13.10 数字滤波器后接单比特接收机 .....	(287)
13.11 数字滤波器组后接单比特接收机和相位比较器 .....	(288)
13.12 数字滤波器组后接另一 FFT .....	(289)
参考文献 .....	(289)
<b>第 14 章 高分辨率谱估计 .....</b>	<b>(290)</b>
14.1 引言 .....	(290)
14.2 自回归 (AR) 方法 .....	(290)
14.3 YULE-WALKER 方程 .....	(292)
14.4 LEVINSON-DURBIN 迭代算法 .....	(294)
14.5 输入数据处理 .....	(297)
14.5.1 协方差法 .....	(297)
14.5.2 自相关方法 .....	(298)
14.6 后向预测和改进的协方差法 .....	(298)
14.7 BURG 法 .....	(301)
14.8 阶的选择 .....	(304)
14.9 PRONY 方法 .....	(304)
14.10 使用最小二乘途径的 Prony 法 .....	(307)
14.11 特征向量和特征值 .....	(308)
14.12 MUSIC 方法 .....	(309)
14.13 ESPRIT 法 .....	(313)
14.14 最小范数法 .....	(314)
14.15 用离散傅里叶变换的最小范数法 .....	(316)
14.16 自适应谱估计 .....	(318)
参考文献 .....	(321)
<b>第 15 章 到达角测量 .....</b>	<b>(324)</b>
15.1 引言 .....	(324)
15.2 队列概念 .....	(325)
15.3 来自线性天线阵列的数字化数据 .....	(326)

15.4	来自于圆形天线阵列的数据	(327)
15.5	二单元相位阵列天线	(329)
15.6	用过零法的 AOA 测量	(331)
15.7	多天线元 AOA 系统中的相位测量	(332)
15.8	空域上的傅里叶变换	(332)
15.9	二维傅里叶变换	(335)
15.10	频率挑选后的 AOA 测量	(336)
15.11	最小天线间距	(338)
15.12	中国剩余定理	(338)
15.13	中国剩余定理在 AOA 测量中的应用	(340)
15.14	应用剩余定理的实际问题	(341)
15.15	数字 AOA 测量中的硬件问题	(342)
	参考文献	(343)
<b>第 16 章</b>	<b>接收机测试</b>	<b>(345)</b>
16.1	引言	(345)
16.2	接收机测试类型	(345)
16.3	在实验室中进行接收机测试的预先考虑	(347)
16.4	通过软件模拟的接收机测试	(348)
16.5	实验室测试装置	(349)
16.6	暗室测试装置	(351)
16.7	初步测试	(351)
16.8	单信号频率测试	(352)
16.8.1	频率准确度测试	(352)
16.8.2	频率精度测试	(353)
16.9	虚警测试	(353)
16.10	灵敏度和单信号的动态范围	(354)
16.11	脉冲幅度和脉冲宽度测量	(355)
16.12	AOA 精度测试	(356)
16.13	TOA 测试	(357)
16.14	滞后时间、吞吐率和反应时间测试	(357)
16.15	双信号频率分辨率测试	(358)
16.16	双信号无虚假动态范围测试	(358)
16.17	瞬时动态范围测试	(359)
16.18	暗室测试	(359)
16.19	AOA 分辨率测试	(359)
16.20	模拟器测试	(360)
16.21	野外测试	(361)
	参考文献	(362)
<b>索引 (Index)</b>		<b>(364)</b>

# 第1章 引言

## 1.1 宽带系统

本书主要讨论电子战 (EW) 接收机的数字信号处理结构。这些接收机必须具有非常宽的瞬时输入带宽 (1GHz 以上), 以满足其使用要求。这就意味着如果不对接收机进行调谐, 在输入带宽内的任何信号都将同时被接收下来。与此相反, 通信接收机的带宽非常窄, 比如<sup>[1]</sup>电视频道的带宽为 6 MHz, 调频 (FM) 电台的带宽为 200 kHz, 而调幅 (AM) 电台的带宽仅 10 kHz。如果同时打开 10 台电视机, 每台电视机接收不同的频道, 那么这样一种接收方式的瞬时带宽约为 60 MHz (10 个 6 MHz 的频道)。

然而, 由于带宽越宽, 从一地到另一地每单位时间传送的信息就越多, 所以通信的带宽也在不断地增加。预计某些通信系统也将达到 1GHz 的瞬时带宽<sup>[2]</sup>, 其中包含 100 个 10MHz 带宽的信道。如果这种趋势持续下去, 那么电子战接收机和通信接收机之间的差异就会消失。通过和通信工程师的进一步讨论发现, 很多主要用于 EW 接收机的硬件设计思想和数字信号处理方法同样也适用于通信接收机。这也就是本书选择“宽带数字接收机”这一书名的原因。本书的重点仍在 EW 接收机, 书中采用的很多例子也都来自 EW 接收机。

## 1.2 数字方法

许多通信和控制问题都已经通过数字方法加以解决。现在很少有人怀疑数字信号处理技术是解决很多工程问题 (比如通信和控制) 的最佳方法。数字电路在 EW 接收机中应用已久, 比如接收机工作模式的数字控制等。此外, 一旦射频 (RF) 信号通过晶体检波器变换为视频信号, 那么该视频信号也可以通过数字方法来处理。到目前为止, 所有 EW 接收机都通过晶体检波器把 RF 变换为视频信号, 但检波器会破坏信号中的载频和相位信息。如果用模-数变换器 (ADC) 来取代检波器, 那么所有信息会被保留下来。宽带接收系统目前正处于发展阶段。

ADC 是把模拟信号变换为数字信号需要的第一个器件。为了能够在宽带接收机中承担起信号变换的任务, ADC 必须能在很高的采样速度下工作; 为了使信号数字化时造成的量化误差, ADC 就必须有很多的位数。一个 ADC 要同时达到这两个目标是非常困难的, 但是 ADC 技术正在以惊人的速度在发展。由于 ADC 技术发展速度太快, 要想对其性能进行有意义的评估也并不容易。图 1.1 给出了 1993 年 4 月对 ADC 的一次调查结果。该图主要基于文献[3]中的有关信息。带有 APRA 字符的“x”符号表示高级研究计划局 (APRA) 所要完成的 100 MHz, 12 位 ADC 计划, 而带有 WL 字符的“x”符号表示 Wright 实验室 (WL) 所要完成的 20 GHz, 4 位 ADC 计划。令人感到欣慰的是现有的某些 ADC 已经可以工作在微波频段 (比如 6 GHz, 4 位<sup>[4]</sup>)。

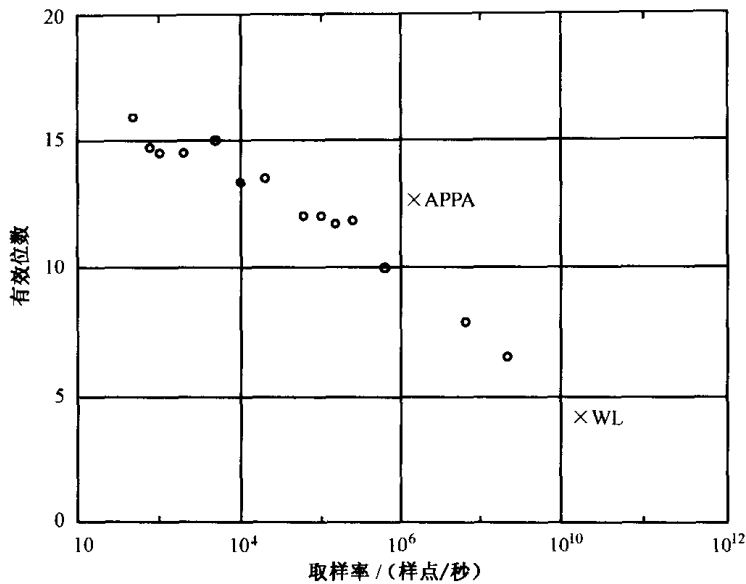


图 1.1 ADC 的性能

高速 ADC 的输出必须由高速数字电路来处理，否则数字化后的数据就会丢失，或者系统只能工作在非实时模式。现有的数字硬件电路工作速度还不能与高性能的 ADC 速度相匹配，数字处理器的速度也跟不上 ADC 的速度。然而，数字处理速度不断加快，终将在宽带接收机中获得应用。通过某些系统设计（如并行处理）可以解决速度问题。从发展趋势看，数字处理速度完全可以满足数字信号处理速度增长的需求。以 PC 为例，在 20 世纪 70 年代后期诞生的第一台 PC 的时钟频率只有几兆赫，而现在 66 MHz 的时钟频率也非常普遍。

用在宽带接收系统中的数字电路，需要的工作频率要比 PC 频率高得多。比如已经设计出了<sup>[5]</sup>工作频率达到 250 MHz 的快速傅里叶变换（FFT）高速芯片。预计进一步发展，工作频率要超过 500 MHz。图 1.2 给出了到 1993 年为止一些通用数字硬件的频率。对一些特殊设计的硬件，其时钟频率将达到 1 GHz。

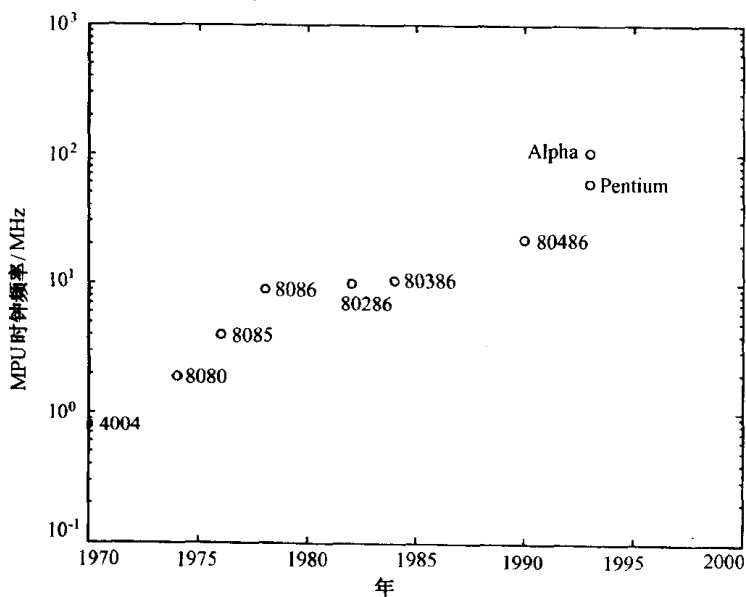


图 1.2 数字处理器性能

随着 ADC 和数字电路性能的改进,在将来 ADC 将取代 RF 接收机中的晶体检波器,这样就会保留相位信息。在有些窄带通信系统中已经采用了这种方法<sup>[7]</sup>。更进一步发展,ADC 将移向接收机前端,也就是说从中频移向射频。将来的接收机设计在天线和 ADC 之间只有 RF 放大器和带通滤波器。

### 1.3 EW 接收机研发中遇到的主要问题

从技术的角度来看,在 EW 接收机设计领域中至少存在两大问题。首先,并不直接工作在 EW 领域的科学家和工程师对 EW 知之甚少,也不了解其需求。而通信领域与 EW 领域有很大不同,对于工科院校,通信是必修课。所以,电子工程师对通信系统都有一些基本了解。

另一方面,EW 知识只在很少的几所军事院校讲授,或讲授的学时很少。所以,要与这一领域之外的科学家和工程师们就某些新的概念进行交流,就显得非常困难。为了解决这一问题,本书的第 2 章专门用来讨论 EW 方面的知识,重点放在侦察截获系统。

另一个问题是 EW 接收机还没有一个被广泛接受的评估标准。往往所有性能参数都被用来描述 EW 接收机,然而,很多这种接收机甚至不能认为是接收机,因为这些接收机并不提供 EW 接收机的那种数据格式,这个问题在第 14 章进行讨论。第 2 章和第 14 章是本书专门介绍模拟和数字 EW 接收机的两个章节。

### 1.4 本书的内容安排

本书讨论了许多不同的研究主题,并按照其相关性安排在各个章节。这些研究主题被分成两大部分。

第 2 和 16 章涉及 EW 接收机,其中第 2 章就 EW 进行一般性的讨论,正如前面所说,其重点放在 EW 接收机上。第 16 章主要介绍 EW 接收机的一些测试方法,以便得到第 2 章所讨论的技术参数。

傅里叶变换及其相关内容放在第 3, 4, 5 章进行讨论。由于在讨论其他内容时要用到傅里叶变换,所以首先介绍这一部分。一些常用的傅里叶变换的例子以快速查询表的形式收集在第 3 章。读者如果对傅里叶变换熟悉可以跳过这一章。第 4 章讨论了离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)。而第 5 章讨论了与 DFT 有关的几个主题。

在宽带接收机中使用的硬件,在第 6, 7, 8 章进行介绍。其中第 6 章讨论 ADC,重点放在器件的性能上,而不是 ADC 的设计。由于 ADC 是一个非线性器件,要对它进行数学分析是非常困难的,要分析也很受限制,所以通过大量的计算机仿真对其性能有一个大概的认识。第 7 章讨论了接收机射频前端的设计,考虑如何用 ADC 来取代晶体检波器的设计问题,包括如何在灵敏度和动态范围之间进行折中。第 8 章讨论频率下变频器,包括模拟下变频方法和数字下变频方法。下变频器的不平衡将会对接收机性能产生影响,本章对其影响的程度进行了预测分析。

灵敏度、频率测量以及接收机的设计等在第 9 章到第 13 章进行讨论。其中第 9 章介绍了几种信号检测机制,这些方法包括时域和频域检测法。第 10 章讨论用于改善测频频

度的两种简单方法，这些方法具有其频率分辨率取决于脉冲宽度的潜在优势，这样宽脉冲就可以获得更高的频率分辨率，这是 EW 接收机非常希望获得的特性。第 11 章介绍了频率信道化的有效方法，并引入了抽取和多率信号处理的概念。第 12 章就性能较低的接收机的简化设计方法进行了讨论，这种接收机可以集成在单个芯片上。第 13 章讨论了在信道化后改善其测频精度的潜在方法，这些方法在设计编码器时可以采纳，编码器的设计通常认为是宽带接收机设计的难点。

第 14, 15 章分别讨论了高频率分辨率和到达角 (AOA) 测量的有关问题，其中第 14 章介绍了几种近三十年以来开发的高分辨率参数谱估计法，这些方法的频率分辨率通常要比 FFT 法高，但其计算量要大得多。第 15 章讨论了 AOA 测量，并就一些实际可能遇到的问题及其解决方法进行了介绍。

## 1.5 特别说明

在本书中附带了很多计算机程序，这将有助于读者加深对有关问题和接收机设计技术的理解，所有程序都是采用 MATLAB 编写的。在第 14 章讨论的大部分高分辨率算法都有相应的计算机程序。

本书中给出的很多图都是用 MATLAB 产生的，时间刻度通常标记为时间取样，因为它表示时域采样点。相应的频率图则标记为频率，因为它是对时域样点进行 FFT 运算后得到的频谱。

如果读者对这一技术领域不熟悉或者没有从本书的开头学习，要识别某些缩写词是非常困难的。用缩写词来表示技术术语非常有用。为方便起见，在每章第一次出现的缩写词即使非常常用也都将其全部拼写出来。

## 参考文献

- [1] *Reference Data for Radio Engineers*, 5th edition, Indianapolis, IN: Howard W. Sams & Co. Inc., 1968.
- [2] Budinger, J., et al. NASA Lewis, Cleveland, OH, Private communication.
- [3] Walden, R. Hughes Research Laboratories, Malibu, CA, Private communication.
- [4] Wang, K. C. Science Center, Rockwell International, Thousand Oaks, CA, Private communication.
- [5] Spaanenburg, H. Honeywell Inc., Bloomington, MN, Private communication.
- [6] Lemnios, Z. Advanced Research Projects Agency, Arlington, VA, Private communication.
- [7] Lennen, G. R., and Daly, P. "A NAVSTAR GPS C/A Code Digital Receiver," *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 36, No. 1, Spring 1989, pp. 115-126.
- [8] Brown, A., and Wolt, B. "Digital L-Band Receiver Architecture With Direct RF Sampling," *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, pp. 209-216, Las Vegas, April 1994.
- [9] Sharpin, D. Wright Laboratory, Dayton, OH, Private communication.



## 第 2 章 电子战接收机的需求与特性

### 2.1 引言

在招聘从事电子战 (EW) 接收机研制工作人员的过程中, 最困难的问题之一是这些人对所从事的课题都了解不深, 尤其是那些刚毕业的学生 (也许是没有把问题跟他们讲清楚的原因)。这一章的主要目的是介绍 EW 接收机的基本概念。EW 接收机的信号环境和需求也将在这一章进行讨论。由于 EW 是针对敌方电子环境所进行的反应活动, 所以其需求将随时变化。如果敌方实施了一种新的威胁, 那么 EW 工程师及其系统就要实时地对其进行反应。

在这一章首先讨论雷达脉冲所包含的信息, 然后介绍在接收机研究中所遇到的困难, 随后简单介绍模拟接收机和数字接收机, 最后讨论 EW 接收机的特性。如果某项特性指标有几种定义, 我们将按照对 EW 接收机有直接影响的定义来加以讨论。这里给出的所有性能指标都是可以测量的, 测量方法放在第 14 章讨论。本章最后还讨论了 EW 接收机的研究趋势。具有 EW 背景知识的读者可以跳过这一章。

### 2.2 电子战简介

EW 系统主要用来保护军事资源免遭敌方威胁。EW 领域由三大部分组成:

电子支援措施 (ESM), 主要用来收集电子环境信息。

电子对抗 (ECM), 主要用来干扰或扰乱敌军系统。

电子防护 (ECCM), 主要用来保护己方设备免遭 ECM 的破坏。

我们把不辐射电磁 (EM) 能量的 EW 系统称之为无源 EW 系统, 而把辐射电磁能的 EW 系统叫做有源 EW 系统。诸如像隐形目标 (避免被敌方雷达发现) 技术和用于迷惑敌方雷达的假目标或箔条 (一种很细的金属丝) 等也都看做是无源 EW, 因为它们也不辐射 EM 能量。在雷达设计中通常也包括 ECCM, 但在这里我们不作讨论。

EW 侦察截获系统可以分成以下五大类:

(1) 声检测系统用来检测敌方声纳和由运动船只产生的噪声。这些系统主要检测的是声信号, 工作频率在 30 kHz 以下。

(2) 通信侦察接收机用来检测敌方的通信信号。这些系统通常工作在 2 GHz 以下, 如果要对卫星信号进行侦察, 那么其工作频率就要高一些。设计这些接收机是用来侦收通信信号的。

(3) 雷达侦察接收机主要用来检测敌方的雷达信号。这些系统通常工作在 2 GHz 到 18 GHz, 虽然有些研究人员也有意将其覆盖到 2 GHz 到 100 GHz 整个频率范围。设计这些接收机是用来侦收脉冲信号的。