

全数字接收机 理论与技术

张公礼 著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书系统地论述了全数字接收机基本理论和实施技术,为研制开发全数字接收机包括 HIJTV, CDMA, TDMA 和第三代移动通信系统以及软件无线电系统等的全数字解调提供了必要的基础。全数字接收机是在接收机前端即中频、高频或靠近接收天线的地方采用模数转换器(A/D 变换)将载波信号转换为数字信号,接收机后续的功能(如下变频、滤波和解调等)全部用数字处理技术实现,它是通信技术、计算机技术和大规模数字集成电路技术结合的产物。它使接收机的结构、功能和发展方式发生了根本的变革。本书的内容包括高效数字调制技术、全数字接收机的结构、最大似然接收机、时变插值滤波器、同步参数估计算法、数字下变频和全数字接收机的硬件结构等。

本书可供从事通信、移动通信、电子信息产业特别是从事新的通信体制研究开发的工程技术人员参考,也可供通信、电子、计算机及相关专业的大专院校师生参考或作为研究生教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

全数字接收机理论与技术/张公礼著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-014754-5

I. 全… II. 张… III. 数字通信系统—通信接收机 IV. TN915.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 132780 号

责任编辑:李 锋 胡 凯/责任校对:曾 茹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 1 月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 1—2 500 字数: 233 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

人们常常提出或听到“数字奥运”、“数字浙江”、“数字××”等说法,这恰恰是时代信息化、信息数字化发展趋势的真实写照。信息数字化就是信息以数字形式传送、交换和广播。随着通信技术的飞速发展,模拟通信系统已在实际应用中渐渐淡出,数字移动电话 GSM, CDMA 已经取代了模拟蜂窝移动通信系统,数字电视广播系统正在中国大地上迅速发展,并将淘汰模拟电视。新的通信体制如第三代移动通信系统(3G)、高清晰度电视(HDTV)和互联网络等无不采用数字通信方式。

但是,使业外人士意想不到的的是目前市场化的数字通信系统如 GSM, CDMA 并没有实现全数字化。数字移动通信或无线通信系统为了远距离传播数字信号,必须将数字信号寄托在正弦载波上,这就是调制技术。由于调制后的载波是模拟信号,因此在整个通信系统中,从发射机调制器开始到接收机解调器为止,系统所传送的信号、采用的器件和信号变换处理的方式都是模拟的。在信息走向数字化的时代,数字通信也要实现数字化。另外,随着通信事业的发展,频带越来越拥挤,一些频带利用率很高的数字通信调制方式如多进制相移键控(MPSK)(主要是 8PSK)、多进制正交幅度调制(MQAM)正在被高速通信系统如 HDTV, TDMD 等所采用,甚至 1024QAM 的通信系统也已有报道。由于这些高效的调制方式对静态相差要求十分严格,采用传统数字通信系统的反馈式模拟锁相环来解调变得难以实现。一种不用锁相环也没有反馈回路的数字式开环结构的解调技术受到人们的重视,这就是全数字接收机技术。全数字接收机是在接收机前端即中频、高频或靠近接收天线的地方采用数模转换器(A/D 变换)将接收机收到的调制载波信号取样、量化,转换为数字信号,接收机后续的功能(如下变频、滤波和解调等)全部用数字处理技术实现。这种全数字接收技术使接收机的结构、功能和发展方式发生了根本的变革:首先,先进的数字计算机技术、微处理器技术可以应用到传统的通信接收机系统,实现通信技术、计算机技术和大规模数字集成电路技术的无缝融合;其次,全数字接收机的硬件具有很好的可重复性和可靠性,对内部噪声、非线性失真和阻抗匹配都有更好的适应性,更适合大规模生产。另外,接收机的变频、滤波和解调功能可以在一个公共硬件平台上用软件实现,采用不同的算法软件可以实现不同调制方式的解调。软件无线电正是在全数字接收机的基础上提出的。

但是,全数字接收机技术和软件无线电技术既有联系又有区别。软件无线电将全数字化的领域由接收机推广到发射机,它考虑整个通信系统的数字化问题;它重视通信系统硬件的公共平台化和算法实现的软件化以及通信控制(特别是天线)

的智能化;它强调可编程性和通信系统功能软件可重新定义性。全数字接收机技术主要侧重于全数字解调的理论和算法研究,它更多关注通信最佳接收机理论的全数字化问题,主要的目的在于用数字处理技术恢复出最终的调制信息。全数字接收机的发展为软件无线电提供了必要的理论基础和实施技术。

本书共分十章。第一章介绍了全数字接收机的基本概念和主要研究内容。第二章讨论了 MPSK 和 MQAM 高效数字调制技术。第三章讨论了 GSM 移动通信系统向第三代移动通信的演进网络——EDGE 中的 8PSK 调制技术。本书后面介绍的全数字接收机的数字解调算法,主要是针对高效数字调制信号提出的。第四章叙述了全数字接收机的基本理论包括全数字接收机的结构,最大似然估计接收机算法,数字解调算法的充分统计量等。第五章的主要内容是时变插值滤波器。通过插值滤波器调整采样时刻实现符号同步,这是开环结构的全数字接收机中的一个特殊问题,本章讨论了插值滤波器的原理、结构和设计方法。第六、七、八三章分别是定时误差估计、频偏估计和载波相位估计算法。这些算法主要解决 MPSK 和 MQAM 信号解调中的载波同步(频率、相位)和符号定时同步问题,这是数字通信系统接收机中的关键技术。第九章讨论了全数字接收机中的数字下变频技术。在简单介绍了多速率信号处理理论与 CIC, FIR 和半带(HB)滤波器后,本章讨论了专用下数字变频器件和 FPGA 在下变频中的应用方法。第十章是全数字接收机的硬件实现技术,主要讨论了硬件结构、取样理论和 A/D 变换技术以及 DSP, CPLD 和 PCI 总线接口技术。本书为研制开发全数字接收机包括 HDTV, TDMA, CDMA 和第三代移动通信系统以及软件无线电系统等的全数字解调提供了必要的理论和技术基础。

本书是在近年来我们从事高效数字调制信号全数字解调算法课题研究的基础上完成的。张翔、汪庆华、张亚男、朱勇、李志荣、罗宏杰、郑国和孙照宇同志在研究生时期的工作为本书提供了必要的技术支持。本书包含了我们课题研究中的一一些体会和见解,其中有的属首次发表。

特别感谢吕秋云同志,本书的公式、图表和 WORD 文档的处理主要是她完成的,她的辛勤工作是本书及时出版的保证。我们还要感谢中国电子科技集团第 36 研究所的孔宪正研究员、杨小牛研究员、陆安南研究员、楼才义和徐建良等高级工程师,他们对我们的课题研究给予了宝贵的支持和帮助。最后,感谢杭州电子科技大学和科学出版社的支持。

张公礼

2004 年 11 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 模拟通信与数字通信	1
1.2 全数字接收机	2
1.3 软件无线电	6
第二章 高效数字调制技术	10
2.1 数字调制解调中的基本问题	10
2.2 多进制相移键控(MPSK)数字调制技术	14
2.3 正交幅度调制(QAM)技术	18
第三章 GSM/EDGE-8PSK 信号的调制技术	23
3.1 EDGE 调制信号的表示法	24
3.2 EDGE 的脉冲成形技术	27
3.3 GSM/EDGE 调制方案	30
3.4 接收滤波器设计	30
第四章 全数字接收机理论基础	37
4.1 全数字接收机的体系结构	37
4.2 信号参量估计与克拉美-罗下界	41
4.3 接收机最大似然估计算法的推导	46
4.4 全数字接收机中的充分统计量	50
4.5 MPSK 和 MQAM 信号同步参数估计中的实际克拉美-罗限	58
第五章 全数字接收机中的插值滤波器	61
5.1 符号(位)定时的重要意义	61
5.2 插值滤波器原理	63
5.3 内插估值过程的控制	65
5.4 插值滤波器设计	67
5.5 适合于高效数字调制信号的插值滤波器	77
第六章 定时误差估计	86
6.1 定时误差的 DA 算法	87
6.2 每符号两采样点的 NDA 定时算法	89
6.3 定时误差的 NDA 平方估计算法	94

6.4	数字滤波平方定时误差估值的统计特性	98
6.5	定时误差的卡尔曼滤波	105
第七章	频偏估计	107
7.1	非数据辅助的频差估计器	107
7.2	数据辅助的载波频偏估计算法	110
第八章	载波相位估计	115
8.1	高阶统计量(HOS)盲载波相位估计算法	116
8.2	采用八阶统计量的盲相位恢复(EOS)	118
8.3	盲载波相位估计性能分析	120
8.4	载波相位 $e^{j\theta}$ 估计算法	130
8.5	直接估计相位 θ 和估计复相位 $e^{j\theta}$ 方法的比较	133
第九章	数字下变频技术	135
9.1	数字变频原理	135
9.2	多速率数字信号处理理论	136
9.3	数字滤波器	143
9.4	专用数字下变频器 HSP50214B	155
9.5	HSP50214B 应用设计和控制原理	157
9.6	采用 FPGA 实现数字下变频	164
第十章	全数字接收机的硬件实现技术	166
10.1	全数字接收机系统硬件结构	166
10.2	模拟信号的取样与 A/D 变换	167
10.3	数字下变频设计	176
10.4	利用 DSP 的数字解调技术	177
10.5	芯片控制电路 CPLD 的设计	180
10.6	PCI 总线与 PCI9054	183
参考文献		187

第一章 绪 论

1.1 模拟通信与数字通信

早期的模拟无线电通信系统主要是话音通信系统,一个模拟无线电话路系统分为发射和接收两个部分,其结构如图 1.1 所示。

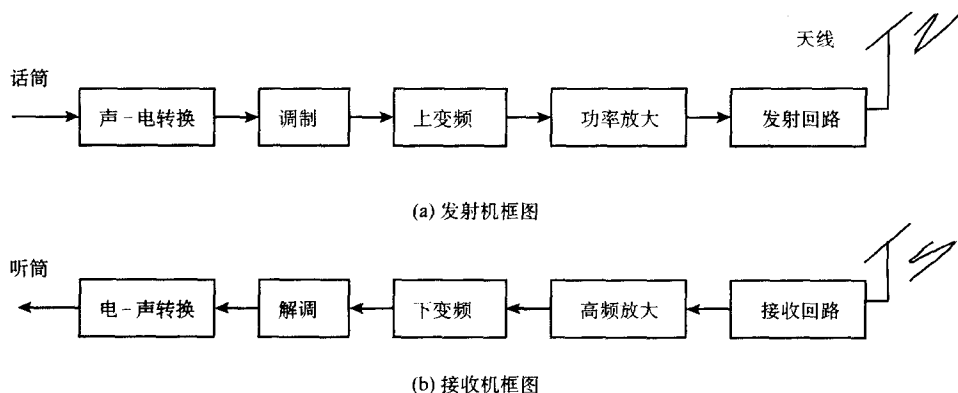


图 1.1 无线电模拟通信系统

这种通信之所以称为模拟通信是因为控制或改变载波参数的信号是模拟信号。什么是模拟信号呢？如果一个电信号的取值范围是一个无穷集合,不管这个集合是连续的还是离散的,那么这个信号就称为模拟信号。如果一个电信号的取值范围是一个有限离散集合,则这个信号就称为数字信号。任何一个有限离散集合都可以和一个有限数字集合 $\{0, 1, 2, \dots, M-1\}$ 建立一一对应关系,在通信中,有了这种一一对应关系,就可以用这 M 个数字取代原来的信号进行传输,这就是人们所说的数字通信。现在常用的移动通信系统无论是 GSM 还是 CDMA 都是数字通信系统。通过取样、量化可以把模拟信号变为数字信号,一个典型的无线电数字通信系统框图示于图 1.2。

由于低频信号不能远距离无线传输,调制器是无线电通信(移动通信)的必不可少部件。到目前为止,无线通信中使用的载波仍然是正弦波,即

$$A \cos(\omega_c t + \theta) \quad (1.1)$$

正弦波有三个可以变化的参数:振幅、频率和相位。调制就是用调制信号(要传输

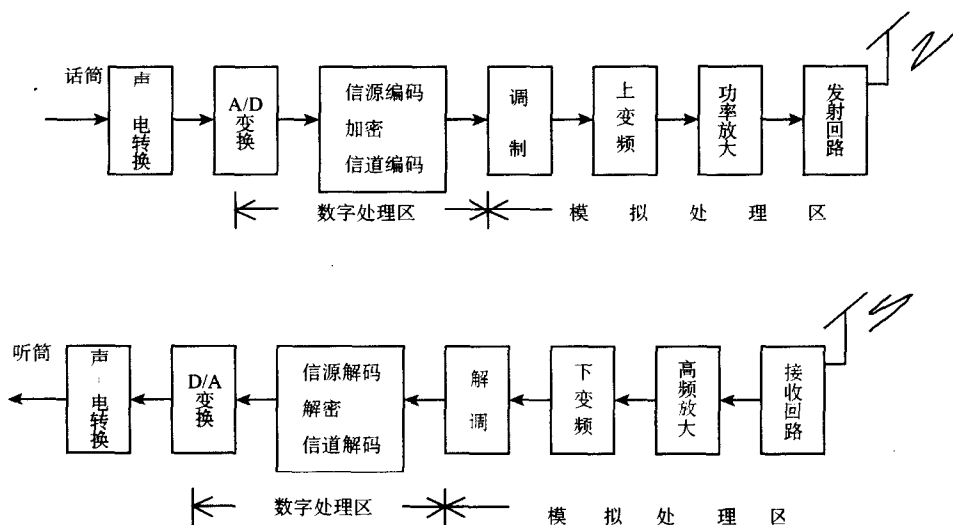


图 1.2 无线电数字通信系统

的信号)控制正弦波的一个或多个参数,使这个或这些参数按调制信号的规律而变化。正弦波是模拟信号,无论调制信号是模拟信号还是数字信号,调制后的信号必然是模拟信号。

在数字通信系统框图中,调制解调、变频、滤波以及天线和空中传播的电磁波的信号形式都是模拟的。从图 1.2 可以看到,一个无线电数字通信系统在发射系统 A/D 变换后和接收系统 D/A 变换之前存在一个数字处理区和模拟处理区。从发射机的调制开始到发射天线,经过空中电磁波传播再到接收机天线,再到接收机解调器,形成了数字通信系统的模拟处理区。在模拟处理区,所有的器件和信号都是模拟的。

从模拟通信到数字通信,通信事业跨越了一个重要阶段,但数字通信并没有实现全数字化,它的调制解调、上变频、功率放大、高频放大、下变频和滤波处理都是模拟的。

1.2 全数字接收机

20 世纪 80 年代中后期,一种新的接收机概念——全数字接收机被提出^[1~8],它和传统的无线电数字通信接收机不同,在数字通信接收机的模拟处理区引入了数字处理技术。最基本的全数字接收机是在接收机的解调器前插入 A/D 变换器,把接收机下变频后的模拟信号变为数字信号,如图 1.3 所示。图中的解码系统包

括信道解码和信源解码。输入到解调器的信号是数字信号不再是模拟信号,因此可以用全新的数字技术实现调制信号的解调。称这种技术为全数字解调技术。

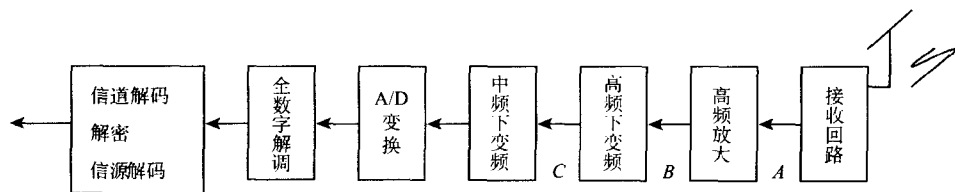


图 1.3 最基本的无线电全数字接收机

注意,全数字解调可以用于数字调制信号的解调也可用于模拟调制信号的解调。这里引入“全数字”的术语,以避免与数字通信中的“数字调制”、“数字解调”等概念相混淆。如果把 A/D 变换器继续向接收机的模拟区推进,推到图 1.3 的 C 位置,那么中频下变频和中频滤波也可以用数字处理技术;如果推到 A 的位置,那么从高频下变频,高频滤波开始就可以进行数字处理。全数字接收机追求的境界是 A/D 变换器尽可能靠近天线, A/D 变换器越靠近天线,接收机的数字化程度越高,但要求数字处理的速度越高,实现的难度也随之增大,甚至达到当前的数字器件无法承受的地步。

全数字接收机要求用数字技术实现解调、滤波、变频等原来用模拟器件完成的功能,它不是也不能简单模仿模拟处理的方法,必须在处理方式上有新的突破。虽然通信中的最佳接收机理论原则上也适用于全数字接收机,但是当调制后的信号被离散和数字化后,引出了一系列的新问题。通信中的最佳接收机理论必须适应信号全数字化的条件,为了解决新问题需要新的发展,由此产生了全数字接收机理论。

那么,全数字接收机和传统的数字通信系统接收机有什么本质的不同?通信的调制载波信号全数字化后引出了什么新问题呢?归纳起来有以下几个方面:

首先,根据通信中的最佳接收机理论,对数字调制信号进行解调本质上是一个联合的检测和估计的问题。在一般通信系统的接收机中,无论对于何种调制方式,几乎都可以应用最大似然(maximum likelihood, ML)准则对接收信号进行最佳的解调^[9]。尽管在多数情况下,ML 接收机不是物理上不可实现的(非因果),就是实现起来过于复杂,因此往往只是作为一种理论上的模型和上限来研究。在载波信号数字化后,如何应用最大似然准则对数字化接收信号进行最佳解调?对这个问题的回答就构成了全数字接收机的基本理论。这是通信中的最佳接收机理论的一种推广和发展,对全数字接收机解调器的结构和实现的研究具有重要意义。

其次,在数字通信中,载波同步和时钟同步是接收机的关键技术。在通常的数

字通信系统中,接收机的载波同步和时钟同步主要利用锁相技术实现,它的主要特点是:①需要将载波相位误差和时钟相位误差信息反馈分别去控制本地载波压控振荡器(VCO)和本地压控时钟(VCC),以达到同步;②同步的性能受到环路滤波器性能的影响,用锁相环(PLL)锁定载波相位和时钟相位并非真正的无偏估计,它们是有偏估计,并且在理论上进行分析也是十分困难的。对于高效的调制方式如MQAM, MPSK, 它们对静态相差要求十分严格,随着 M 的增大,锁相环的设计更加困难,因此这种技术的使用受到限制。全数字接收机主要采用开环结构,解调用的本地参考载波和采样时钟都振荡于固定的频率。这样,可以克服传统的接收机中需要将信号反馈到前面进行反馈控制以及在采用高效传输方式时锁相环设计困难等问题。其他的工作如:载波相位误差和位时钟相位的消除、最佳采样点值的估计、符号的判决等,全部由采样后的数字信号处理器完成,这样有利于整个接收机的全数字化、集成化。另外,从理论上说,全数字接收机采用开环结构具有快速的跟踪速度,不会出现所谓的 Hang-up^[10]现象(很多情况下锁相环路的鉴相器会对某些特定的相位误差区域呈现盲区效应)。最重要的是它的系统工作时钟一般只是符号时钟的 2~4 倍,而闭环结构的全数字接收机的数字处理工作时钟往往必须是符号时钟的十几倍、几十倍才能满足抖动性能要求,因此对于高速的应用来说只有开环结构才比较适合于全数字实现。全数字接收机由于采用开环结构产生的问题之一是相位误差和时钟误差估计算法比较复杂。采用锁相技术的传统接收机不需要计算相位和时钟误差的精确数值,只要知道误差信号的变化方向利用反馈回路进行相应调整就可以了。但是,全数字接收机必须确定误差的精确数值,才能进行前向校正。因此,开环结构的全数字接收机必须解决三个误差估计问题:载波频率误差(即相位的变化的误差)估计、符号定时误差估计和载波相位误差估计。准确的频率误差和相位误差的数值求出后,可以用相位旋转器对载波参数进行纠正,但定时误差的纠正就不那么简单了,这就引出了插值滤波问题。

插值滤波是全数字接收机中的特殊问题,这个问题在一般的接收机中是不存在的。在传统的接收机中,利用符号同步的锁相环,符号时钟误差信号以前向或后向方式控制压控振荡器相位的调整,直至锁相环稳定最后锁定在最佳采样点处,从而直接得到了最佳采样点的值。但在全数字接收机中则不同,因为 A/D 采样的时钟是固定的,接收机的采样速率与发送的符号速率是相互独立的,这样最佳采样点的值不能通过直接采样得到,当抽样时钟与数据码元不同步时,就需要在非同步的抽样数据之间进行插值,来获得同步的信号样值。在全数字接收机中,信号在最佳采样点的值不能通过直接采样得到的,而是通过定时误差估值控制内插滤波器对采样得到的信号样本值进行插值运算,从而得到信号在最佳采样时刻的近似值。因此内插处理器的性能直接影响着整个系统的性能,设计性能良好的内插滤波器是全数字接收机的关键。

最后,全数字接收机的信号采样问题也比普通的 A/D 变换复杂。采样的目的是用数字信号代替原来的模拟信号,这就要求采样信号含有被采样信号的所有信息。但是,在无线电接收机中,调制后的载波信号频率很高,特别在下变频之前,信号频率可达几百 M 甚至几 G 数量级,采用 Nyquist 准则取样是不可能的。必须研究带通取样、抗混叠滤波等问题,还必须解决窄带中频取样、宽带中频取样和射频采样中的一些特殊问题。对于全数字接收机的宽带中频取样或直接射频采样,由于采样频率很高,采样后的数据速率更高,这对后面的适时解调处理造成了很大困难,甚至无法实现。实际的解调器只对一路调制信号解调,调制信号的速率是低速的,一般为几百 K 或几 M,取样信号只要包含调制信号的信息就足够了。为此必须解决采样速率的变化处理问题,这就形成了多速率信号处理理论。

回顾全数字接收机的研究历史,其发展过程经历了几个阶段。20 世纪 80 年代初,人们对模拟通信系统如调频、单边带调制、短波调幅等信号的全数字接收问题做了初步研究,虽然那时概念还不十分明确,但已经提出了“全数字(all-digital)”这一术语^[1,2]。20 世纪 80 年代中后期,德国的 Heinrich Meyr 等人研究了数字通信系统的全数字接收机问题^[3]。当时他们设计并实现了一个 8PSK 的全数字接收机系统。该系统最有价值的思想是在接收机中用一个固定频率的自由振荡器来对基带信号进行异步采样,同时采用最大似然算法对接收信号的载波和时钟相位误差进行直接并行的估计和校正。无疑,Meyr 等人提出的数字调制信号全数字接收机在理论和实践上都具有开创性。当然,Meyr 等人主要强调了直接估计的思想,对于异步采样给接收机带来的重要影响并没有进行深入的分析,而且今天看来 Meyr 的全数字接收机显得过于庞大和复杂,没有太多的实用价值,但是全数字接收机的研究工作却沿着 Meyr 等人的思路发展起来。

此后,在较长的一段时间内,全数字接收机的体系结构并没有获得突破,仍然采用或模仿了经典的以 PLL 为基础的递归反馈式的接收机体系结构,人们所提出的载波和时钟相位误差估计算法往往也是以这种结构作为讨论的前提。因此,异步采样带来的影响仍然没有引起足够的注意。直到 1993 年前后,F. M. Gardner 和 J. Armstrong 等学者,详细分析了异步采样对数字接收机所带来的影响,指出在异步采样条件下,本地采样时钟与发送端的符号发送时钟是不相关的,必须采用内插的方法利用信号样值对最佳采样点进行估值,才能够获得与发送端一致的传输码流^[12~14]。也就是说,必须通过内插在信号样值上实现位时钟调整,以及最优采样点的估值。显然,Gardner 等人的研究工作瞄准了全数字接收机发展中的另一个关键问题:采用插值滤波器实现符号时钟调整。利用内插来估计信号的最佳样值点的主要目的在于减小信号的采样速率从而提高可实现性,插值滤波器的设计和控制成为全数字接收机实现的一个关键问题。此后,许多学者对该问题进行了研究,取得了许多重要的成果^[15]。需要指出,Gardner 等人用一个以 NCO 为中

心的反馈环路来控制内插估值过程,那么为了获得所必须的内插精度,将要求很高的 NCO 工作时钟。这就是说,对于高速的应用来说,内插估值过程的控制应当是无反馈的开环控制,从而时钟相位误差的估计也应当是开环的直接估计。在这种情况下,许多学者意识到,全数字接收机的体系结构不能继续沿用传统接收机的反馈式体系结构,他们提出了前馈式或开环载波与时钟相位误差估计的算法^[16~22],从而开始了前馈式或称开环接收机的研究工作。从此,数字接收机的结构和算法才与传统接收机有了本质的区别。人们还深入分析了全数字接收机的模拟预滤波和采样率,体系结构,异步采样条件下最佳样值点估值,同步参数估计等一系列基本理论问题,并给出了全数字最大似然最佳接收机的算法和结构。它要求对每一种符号序列、载波相位、位时钟相位的可能组合都进行似然测度的计算,然后从中选取最大值。这个并行枚举搜索过程非常复杂并且包含非因果操作,因此,这种全数字最大似然最佳接收机算法和结构都是不可实现的,但它可作为次最优可实现结构的基础,仍具有重要的理论和实际意义。为获得全数字接收机的可实现算法和结构,必须将最大似然最佳接收机算法简化。对不同的调制信号和不同的应用场合,可以得到不同的简化算法和结构。近年来,国内外学者正是沿着这个方向开展了研究工作。针对一些高效数字调制信号,研究了载波频偏校正问题、载波相位恢复问题和采样时钟的同步问题以及软件硬件实现问题。

1.3 软件无线电

软件无线电是在全数字接收机概念的基础上提出来的,它将全数字接收机的思想向两个方面进行了推广。第一,将数字化区域由接收机推广到发射机,图 1.4 给出了软件无线电发射机和接收机框图。可以看出,在理想的情况下,软件无线电系统只有从发射天线(包括功率放大器)经过电磁波传播到接收机天线是模拟区,其他传输部分全部数字化。第二,信号处理部分,包括调制解调、上变频下变频、滤波等全部在构建的硬件平台上用软件实现。

软件无线电借鉴了计算机的结构和发展思路。计算机的硬件和软件是相对独立的,硬件构成了公用平台,在公用平台上安装不同的软件就构成了具有不同功能的计算机,在更新换代方面,软件和硬件既有关联又相对独立。按照这样的思路,你将来的手机就是一部小型计算机,安装不同的软件就具有不同的功能。它可以是 GSM 手机,也可以是 CDMA 手机,甚至可以变成一部不同移动通信网络的接驳器。体现可编程的软件无线电接收机和发射机的框图示于图 1.5。

软件无线电技术是全数字接收机技术的推广和扩展,但两者也有不同之处。软件无线电更多地侧重于射频信号的直接处理,包括数字频率合成、采样变换、数字滤波等。它所面对的往往是一个包含有多个射频频道的信号,或者是不同模式

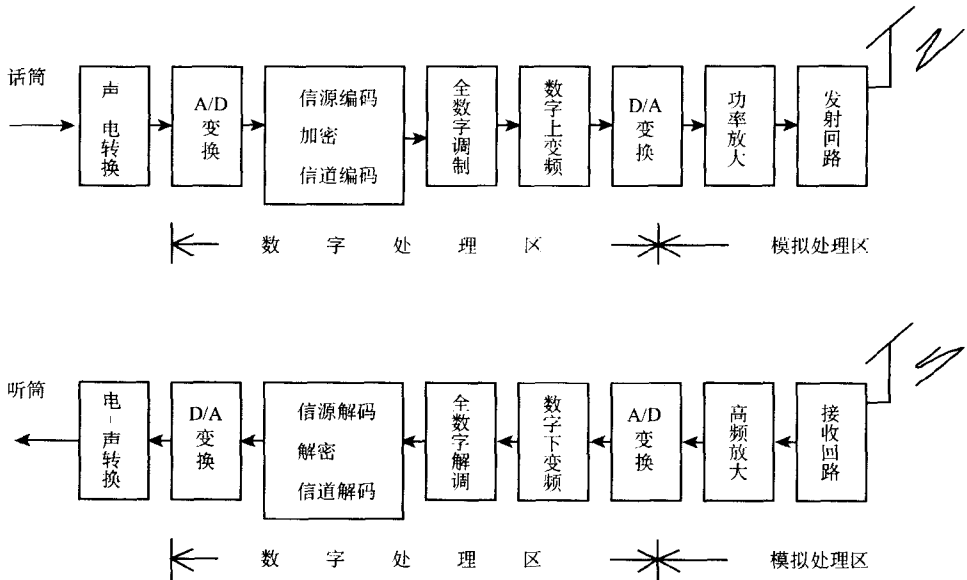


图 1.4 软件无线电发射机和接收机框图

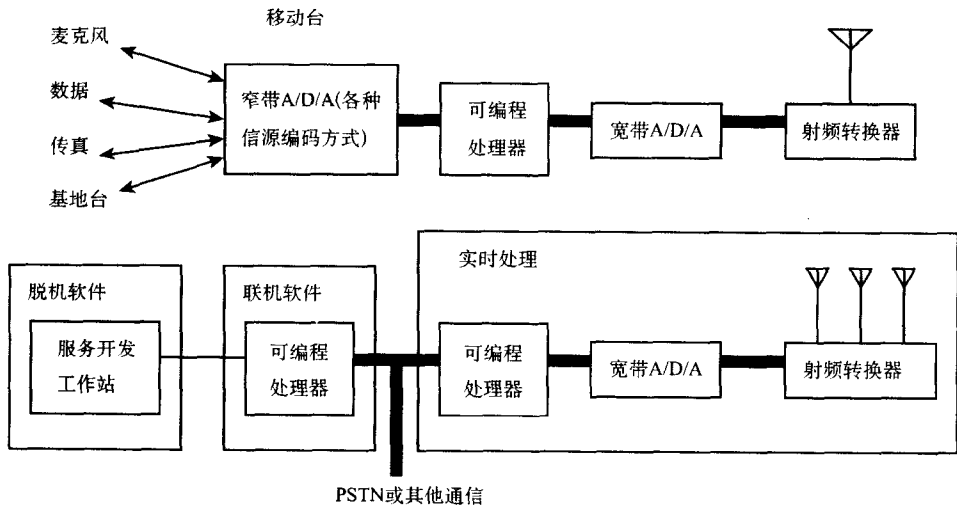


图 1.5 典型的软件无线电发射与接收框图

和体制的传输信号,通过一个统一的硬件平台和不同的软件程序来进行接收和处理,它强调可编程性和通信系统功能软件可重新定义性。而全数字接收机技术则

主要侧重于中频之后的信号处理,它面对的通常是一路独立的已调信号,主要的目的在于恢复出最终的调制信息,它更多关注通信最佳接收机理论的全数字化问题。全数字接收机的发展为软件无线电提供了必要的理论基础和实施技术。

软件无线电(software radio)^[23]是由 J. Mitola 于 1992 年作为一种实现无线通信系统的新的体系结构首次提出的。现在无线通信领域存在着一些问题,如:新的通信体制和“标准”不断提出,通信产品的生存期缩短,开发费用上升;各种通信体制共存,而对多种体制间的互联要求也日趋强烈;另外,无线频带越来越拥挤,对通信系统的频带利用率和抗干扰能力要求不断提高。这样原来以硬件为主的无线通信设计方法难以适应这种局面,针对这些问题,软件无线电的概念便应运而生。目前国内外对软件无线电的研究呈上升趋势。美军已经成功地研制了 Speakeasy 多频段多模式电台^[24],它能同时处理 4 种不同的信号波形(包括从 AM 到 M-QAM 等),能够兼容美军 15 种以上的电台(这些电台在频段、通信制式、组网方式、调制方法、语音速率、编码方式以及信息保密方法上都有很大差异)。而且 Speakeasy 的大部分功能都用软件实现,因而是可编程的。美国麻省理工学院计算机科学实验室的 SpectrumWare 项目就是从通用计算机体系结构实现软件无线电的角度出发,引入了更多的软件成分,提出并试图实现“虚拟”无线电(virtual radios)。此外,Ericsson, Motorola 等公司就软件无线电在移动通信基台方面进行了深入的研究,美国 Airnet 公司已经研制出可以灵活配置的移动通信基台。可见,软件无线电无论在军用还是在民用领域都有广泛的应用前景。

软件无线电的基本概念是把硬件作为无线通信的基本平台,而把尽可能多的无线及个人通信功能用软件实现。这样,无线通信新系统、新产品的开发将逐步转到软件上来,而无线通信产业的产值将越来越多地体现在软件上。软件无线电的核心思想是在尽可能靠近天线的地方使用宽带 A/D 和 D/A 变换器,并且尽可能多地用软件来定义无线功能。可以看出,所谓软件无线电,其关键思想与传统结构的主要区别在于:将 A/D 和 D/A 向 RF 端靠近,由基带移到中频,甚至到射频;同时用高速的 DSP/CPU 代替传统的专用数字电路与低速 DSP/CPU 做 A/D 后的一系列处理。目前国际上普遍认为,在未来应用中,软件无线电不是简单的发送,它能标注出可用的传输信道,探测传播通道,进行智能的调制方式选择,在正确的方向调节发送波束,选择合适的功率电平进行发送;同时,软件无线电也不是简单的接收,它能标注出本信道和邻近信道的能量分布,识别接收信号的模式,自适应地消除干扰,对所要求信号的多径特性进行估计、自适应均衡,对信道调制进行树状译码,然后通过前向纠错达到尽可能低的误码率。此外,软件无线电还可通过众多的软件工具支持增值业务。

但由于器件的限制,目前实现软件无线电必然要做某些折衷,这些折衷应尽量保证实际的方案能保留软件无线电的特点、优势和竞争力,同时具有很好的可行

性。因此,在研究过程中既要根据现有的技术条件采取一些实用的方案以实现某些急需的应用系统,并借此摸索软件无线电研制过程中会遇到的问题,同时也应意识到现在的方案中所采用的许多技术是临时性的,随着硬件技术的发展可能将不再有意义。所以,针对软件无线电的特点,研究具有普遍意义的、不局限于特定硬件水平的长远期的技术是很重要的,也是最终在软件无线电技术上取得领先地位的关键。

最后需要指出,无论是软件无线电还是全数字接收机技术都不限于无线通信或移动通信,它的理论和技术都可以全部或部分地应用到任何以正弦波为信息载波的传输系统。

第二章 高效数字调制技术

高效数字调制系统主要指多进制移相键控(MPSK)和多进制正交幅度调制(MQAM)^[10,25,26],目前用到的多进制数字调制系统有 QPSK, 8PSK 和 16QAM; 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM 和 512QAM, 1024QAM 也已见于应用。这些调制系统具有较高的频带利用率,在一些高数据率通信系统中,如 HDTV 和时分多址(TDMA)通信系统主要采用高效数字调制技术。由于传统的反馈锁相环数字接收技术对多进制调制信号并不是很有效,因此在全数字接收机技术的研究中也把主要目标放在这些高效数字调制信号的数字解调问题上。在这一章中我们将讨论 MPSK 和 MQAM 调制技术,下一章将讨论一种特殊的 8PSK 调制系统,即 GSM/EDGE - 8PSK。

2.1 数字调制解调中的基本问题

对载波进行调制是无线电通信和带通信道通信必不可少的处理过程。通过调制把信息寄托到载波上,使载波的某一参数随信息的变化而变化。表 2.1 列出了主要的调制方式及用途。

表 2.1 常用调制方式及用途

调制方式			用途
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅(AM)	广播
		抑制载波双边带调幅(DSB)	立体声广播
		单边带调幅(SSB)	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅(VSB)	电视广播、数传、传真
	非线性调制	频率调制(FM)	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制(PM)	中间调制方式
	数字调制	幅度键控(ASK)	数据传输
		频率键控(FSK)	数据传输
		相位键控 PSK, DPSK, QPSK 等	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 QAM, MSK 等	(提高频带利用率)数字微波、空间通信

随着通信技术的飞速发展,模拟调制方式正逐渐淡出,数字调制方式得到了迅速发展和广泛应用。数字调制就是用基带数字信号控制高频载波,把基带数字信号变换为带通信号的过程。把带通信号还原基带数字信号的反变换过程称为数字解调。通常我们把数字调制及解调合起来统称为数字调制,采用数字调制方式的通信系统称为数字通信系统。

同模拟调制一样,数字调制也主要分为调幅、调频和调相,分别称为幅度键控(ASK)、频率键控(FSK)和相移键控(PSK),其中数字调幅是最基本的。乘法器是实现调幅的基本器件,如图 2.1 所示。

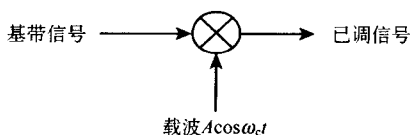


图 2.1 2ASK 调制器

调频能用多路载波键控即多路调幅实现。利用三角公式,调相信号

$$\begin{aligned} A \cos[\omega_c t + \theta(t)] &= A \cos\theta(t) \cos\omega_c t - A \sin\theta(t) \sin\omega_c t \\ &= I(t) \cos\omega_c t - Q(t) \sin\omega_c t \end{aligned} \quad (2.1)$$

其中

$$\begin{aligned} I(t) &= A \cos\theta(t) \\ Q(t) &= A \sin\theta(t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

ω_c 为载波角频率,在以后的论述中除非特殊说明,否则 $\omega_c = 2\pi f_c$ 。

$I(t)$, $Q(t)$ 分别称为同相分量和正交分量。利用式(2.1),相位调制可以用两路正交的调幅来实现,如图 2.2 的后半部分所示。事实上,几乎主要的数字调制方式(MPSK, MQAM)都可以用图 2.2 给出的数字正交调制实现方框图实现。

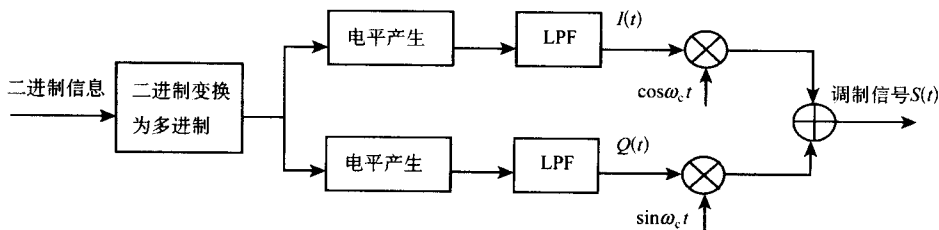


图 2.2 正交调制的实现框图

调制信号的信息包含在 $I(t)$, $Q(t)$ 内。显然,正交调制实际上是两路调幅,图中的乘法器实现了载波幅度调制过程。 $I(t)$, $Q(t)$ 取决于发送的信息和调制方式, $I(t)$, $Q(t)$ 与发送信息的对应方式决定了调制方式。

为了便于信号发射,提高信道利用率、发射功率效率以及改善通信质量,人们