

卫星导航软件接收机 原理与设计

董绪荣 唐 斌 蒋 德◎著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

卫星导航软件接收机 原理与设计

董绪荣 唐斌 蒋德 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航软件接收机原理与设计/董绪荣,唐斌,蒋德著. —北京:国防工业出版社,2008.12

ISBN 978-7-118-05864-2

I. 卫... II. ①黄... ②唐... ③蒋... III. 卫星导航—导航系统—接收机 IV. TN967.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第105874号

※

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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 $\frac{3}{4}$ 字数 252 千字

2008年12月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 26.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

全球卫星导航系统(GNSS, Global Navigation Satellite System)是航天大国的重要特征,美国和俄罗斯已经建成这种系统(GPS和GLONASS),欧洲也即将建成Galileo系统,日本也在建设QZSS(Quasi Zenith Satellite System),我国也已经建成了北斗双星导航定位系统。据称,2009年开始美国将发射第三代GPS卫星,2030年完成全球星基导航的全部部署。

众所周知,GPS卫星导航技术无论在军事还是民用领域都已经取得了广泛的应用,而且正如美国前副总统戈尔曾预言的那样,全球卫星导航系统将会像互联网一样进入千家万户。因此,世界各国均在积极地推进卫星导航系统的发展与应用。作为全球卫星导航系统三大组成部分之一的用户接收机,也不断进入了一个又一个迅速发展和深入探索的时期。卫星导航软件接收机技术就是在这种情况下发展起来的,逐渐成为了本领域一个重要的发展方向。它采用软件无线电的设计思想,把下变频、滤波、捕获、跟踪、解调、测量、PVT解算等功能用软件在通用的数字信号处理器件(如FPGA/DSP)或者通用的处理器(如PC)上实现。软件的可编程性可以保持接收机的通用性,还能实现新标准、新信号的体制兼容。

由于我国在这一领域的研究起步较晚,到目前为止,国内该领域出版的论著非常少。针对这种情况,我们认为根据自己的研究成果,再结合国内外最近几年发表的有关文章,编写一部关于卫星导航软件接收机原理与设计的专著,具有重要的理论意义和实用价值。在撰写本书时,一方面力求使其具有较高的学术水平;另一方面又不失其实用性和系统性。本书取材直到2007年,研究的主要内容为软件接收机的关键技术,包括高

灵敏度捕获、动态环境下的载波跟踪以及抗多径码跟踪等,因此,具有先进性和较高的学术水平。与此同时,本书还侧重于应用,接收机各部分的功能被细分,接口被标准化。根据不同的应用需求,可以连接成相应功能的软件接收机。本书理论与实际并重,因此,可供从事卫星导航理论研究和应用研究的工程技术人员学习参考。

本书的研究思路遵循从 GPS 到 GNSS、从一般模型到具体信号处理功能实现、从仿真语言到高级语言、从非实时到实时循序渐进进行。具体章节安排如下。

第 1 章概述 GNSS 接收机技术的研究现状与发展趋势,从我国北斗双星导航定位系统建设和发展的实际需求出发,论述了卫星导航软件接收机关键技术研究的重要意义;介绍了国内外在卫星导航软件接收机研究上的代表性成果;比较了目前软件接收机实现的各种平台与优缺点。第 2 章从卫星导航软件接收机和软件中频信号模拟器设计的双重要求出发,介绍了 GNSS 导航信号的发展与现代化现状,总结出导航信号发展的一般规律;分析了导航信号生成方式、自相关特性以及跟踪性能;建立了信号在发射时刻、到达接收机天线相位中心以及 RF 前端 ADC 输出 3 个关键节点的数学模型。第 3 章阐述了 GPS/Galileo L1 中频软件信号模拟器结构,并设计了各模块的功能;有所侧重地在卫星钟差模型、电离层闪烁模型以及多径效应模型的建立上提出了一些新的方法与思路;为满足软件接收机测试的实际需要,对载噪比、信号传播时间以及多普勒频移的计算作了说明。第 4 章介绍了导航卫星信号捕获的基本原理及捕获的一般过程;阐述了软件接收机基于 FFT 的并行码相位搜索捕获策略;推导了差分相干积累和非相干积累的检测量的统计分布;依据实际应用背景,对前人提出的差分相干积累作了有益简化,完整给出了一种新的基于 FFT 的简易差分相干积累高灵敏度软件接收机的捕获方法。第 5 章重点讨论了一种新的基于模糊控制逻辑器的软件接收机智

能载波跟踪软环设计方案,从模糊产生器、模糊推理机、模糊规则库、模糊消除器4个方面详细说明了模糊逻辑控制器的设计方法,并推导了基于双线性变换的三阶锁相环的数字实现形式。第6章重点研究了低信噪比条件下软件接收机多径估计技术,给出了一种新的基于有色噪声卡尔曼滤波的最大似然多径估计算法。第7章研究了实时单频GPS软件接收机的信号快捕算法和基于SIMD指令的相干积分累加计算优化技术;从软件接收机整体实现的角度,分析了软件接收机与数字硬件接收机在伪距计算上的不同,利用Nordnav R30软件接收机接收并保存的实际中频GPS信号数据对本书设计的软件接收机进行了验证测试。第8章分析了采用FFT方法跟踪微弱GPS信号的原理,提出了使用FFT和锁频环(或锁相环)结合的复合软环跟踪微弱GPS信号的方法,该方法可以改善环路的动态性能;给出了一种新的减小互相关干扰的方法——Q路滤波法,推导了该方法的有关模型,通过Matlab仿真程序验证了该方法可以有效地减小互相关干扰。

本书在撰写和出版过程中得到了赵洪利、王元钦、李东华、张伟、张铁成、单玉泉、杨娟、孙万、周杨的大力支持和帮助;唐卫涛和刘舒苜提供了宝贵的参考资料,在此一并表示衷心感谢。撰写中所基于的研究成果,得到了许许多多国内外同行专家的指导和帮助:感谢曹冲研究员在GNSS接收机技术进展方面的指导;感谢北京卫星电信研究所倪守昀工程师所做的实验和提供的中频数据;感谢加拿大New Brunswick大学Weihua Zhuang博士在有关码的多普勒频移方面的解疑;感谢新西兰Wellington DSIR的R. B. Davies和德国Infineon Technologies AG的Andreas Schmid博士在高灵敏捕获检测概率计算方法上的指导;感谢丹麦Aalborg大学Kai Borre教授在Galileo软件接收机研究方面的指导;感谢美国Stanford大学Grace Gao博士有关GIOVE-A卫星信号伪随机码的解疑;感谢美国Cornell大学Mark L. Psiaki教授有关实时软件接收机的指导;感谢从事GPS

开源计划的鲁郁博士在研究过程中的鼓励；感谢天津 712 通信广播公司王伦发工程师、清华同方的程昱工程师在接收机程序调试方面传授的经验。

本书不妥和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

著者

2007 年 12 月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 卫星导航系统概述	3
1.2.1 GPS	3
1.2.2 俄罗斯 GLONASS	13
1.2.3 欧盟 Galileo	20
1.2.4 中国北斗双星导航定位系统	30
1.3 GNSS 软件接收机的研究背景与意义	37
1.3.1 GNSS 接收机的发展现状与趋势	37
1.3.2 我国卫星导航定位系统建设和发展的现实需求	39
1.3.3 研究的重要意义	40
1.4 国内外卫星导航软件接收机研究概况	42
1.5 本书的组织	46
1.5.1 软件接收机数字处理实现技术比较分析	46
1.5.2 本书研究的总体思路	49
第 2 章 导航卫星的信号特性与中频信号数学模型	52
2.1 GPS 信号的特性	52
2.1.1 频率和调制格式	52
2.1.2 功率电平	56
2.1.3 相关函数	59
2.1.4 GPS 信号的现代化	61
2.2 GLONASS 信号的特性	65
2.3 Galileo 信号的特性	66

2.3.1	频率分配	66
2.3.2	Galileo L1F 信号	68
2.3.3	L1F 信号与 L1 C/A 码信号的比较	71
2.4	导航信号的发展规律与 BOC 调制研究	73
2.5	GPS/Galileo L1 中频信号的数学模型	77
2.5.1	导航卫星发射的信号	78
2.5.2	到达接收天线相位中心的 LOS 信号	79
2.5.3	RF 前端 ADC 输出的数字化信号	81
2.6	本章小结	83
第 3 章	中频信号模拟器设计	84
3.1	中频软件信号模拟器结构	85
3.2	导航信号的传输误差模型	87
3.2.1	卫星时钟误差仿真模型	87
3.2.2	电离层误差仿真模型	91
3.2.3	对流层误差仿真模型	97
3.2.4	多径效应仿真模型	100
3.2.5	噪声模型	106
3.3	中频信号模拟器的实现	107
3.3.1	可见卫星的确定	108
3.3.2	信号传播时间的确定	111
3.3.3	导航电文的产生	113
3.4	本章小结	120
第 4 章	软件接收机的信号高灵敏度捕获	121
4.1	捕获技术概述	123
4.1.1	二维搜索捕获	123
4.1.2	串行搜索捕获策略	127
4.2	软件接收机并行码相位搜索捕获策略	128
4.3	微弱信号的捕获	133
4.3.1	微弱信号的概念	133
4.3.2	平方损耗分析	134

4.3.3	新差分相干积累算法的提出与检测概率分析	139
4.3.4	IDC 算法与 NCH 的性能对比	144
4.4	算法的实际捕获验证与精确频率估计	150
4.4.1	IDCF 高灵敏度捕获的完整结构	150
4.4.2	算法的实际捕获验证	152
4.4.3	精确频率估计	154
4.5	本章小结	156
第 5 章	软件接收机动态环境载波跟踪技术	158
5.1	引言	158
5.2	载波跟踪环路的数学模型	159
5.2.1	Costas 环的数学结构	159
5.2.2	环路的线性模型	163
5.3	噪声对 PLL 鉴相器的影响分析	166
5.3.1	鉴相器输出均值的解析表达式	166
5.3.2	鉴相器输出特性验证	169
5.3.3	鉴相器输出误差比较	172
5.4	软件接收机动态环境下智能载波跟踪软环研究	174
5.4.1	动态应力误差对环路滤波器的影响分析	174
5.4.2	基于模糊逻辑的智能载波跟踪环路设计	176
5.4.3	数字软件锁相环设计	181
5.4.4	智能环路的动态条件测试	184
5.5	本章小结	190
第 6 章	软件接收机码跟踪与多径估计技术研究	192
6.1	引言	192
6.2	延迟锁定环的数学模型分析	193
6.2.1	DLL 的一般结构	193
6.2.2	软件接收机中本地码的产生	195
6.2.3	码鉴别器特性分析	197
6.2.4	一种新的 BOC 调制信号的鉴别器算法	201
6.3	多径对码跟踪环路的影响与多径消除技术	

对比分析	206
6.3.1 多径干扰引入到码跟踪环的误差	207
6.3.2 几种现有的抗多径方法对比分析	209
6.4 一种新的基于有色噪声卡尔曼滤波的多径 估计技术研究	212
6.4.1 码的相干积分累加过程与多径估计	212
6.4.2 最大似然多径估计模型	213
6.4.3 有色噪声的卡尔曼滤波状态方程与观测方程	215
6.4.4 有色噪声的卡尔曼滤波的递推公式	217
6.4.5 算法的实际应用验证	218
6.5 多径估计延迟锁定环设计	224
6.6 本章小结	225
第7章 实时单频 GPS 软件接收机信号处理技术研究	227
7.1 引言	227
7.2 基于 FFT 的软件接收机快速捕获技术研究	229
7.2.1 快捕算法设计	230
7.2.2 一种新的精确码相位分析方法	233
7.2.3 快捕算法运算量对比分析	236
7.3 本地载波和码的表格设计	239
7.4 基于 SIMD 指令的相干积分累加实时计算研究	242
7.4.1 实时软件接收机跟踪环路结构与相干积分累加 运算量分析	242
7.4.2 SIMD 技术与相干积分累加乘法计算指令优化	244
7.4.3 基于流水线的程序优化与运算量分析	248
7.4.4 相干积分累加整体运算量分析与验证	250
7.5 实时单频 GPS 软件接收机实现与功能验证	254
7.5.1 基于 PC 机的软件接收机整体实现考虑	255
7.5.2 实时软件接收机的验证	258
7.6 本章小结	264
第8章 微弱 GPS 信号的跟踪与多址干扰抑制	266
8.1 微弱 GPS 信号跟踪方法	266

8.1.1	使用 FFT 进行载波跟踪	267
8.1.2	载波辅助的码跟踪环	268
8.1.3	改进的微弱信号载波跟踪方法	271
8.2	几种跟踪算法的性能仿真及比较	273
8.3	互相关干扰抑制技术研究	279
8.3.1	常用的减轻互相关干扰的方法	279
8.3.2	信号的性质	281
8.3.3	Q 路滤波法	283
8.3.4	算法仿真验证	286
参考文献		289

第 1 章 绪 论

1.1 引言

全球卫星导航系统(GNSS, Global Navigation Satellite System)是航天大国的重要特征,美国和俄罗斯已经建成这种系统(GPS和GLONASS),欧盟也即将建成Galileo系统^[1],即使日本也在建设QZSS(Quasi Zenith Satellite System)^[2]。我国建成的北斗双星导航定位系统,是一个初级区域性卫星定位系统,尚不能满足日益发展的导航需要,发展新一代性能更高的卫星导航系统,势在必行^[3]。

作为目前使用最为广泛的GPS,无论在军事还是民用上,都有很大的借鉴意义。1973年,为了满足军事部门和民用部门对实时和三维导航的迫切要求,美国军方制定了“授时与测距导航系统/全球定位系统”(NAVSTAR/GPS, Navigation System Timing And Ranging/Global Positioning System)计划,通常简称为“全球定位系统”(GPS),提供高精度的、可连续的、实时的导航定位服务。它能同时提供用户的三维坐标、三维速度分量和精确定时。它是目前技术上最成熟且已实用的一种卫星导航和定位系统。截至2004年7月23日,在过去的30年时间里,美国已经发射了50颗GPS导航卫星,基本上是发送一颗新卫星,替换一颗旧卫星。2006年底美国又发射了11颗GPS卫星。按计划,2006年—2008年底再发射12颗GPS卫星,2009年开始发射第三代GPS卫星,2030年左右完成全球星基导航的全部部署。在世界范围内,目前,应用的GPS处于第二代末期、第三代初期,标志着试验系统的结束。

第二代主要解决了 GPS 定位精度的问题,但是系统抗干扰、抗欺骗问题还没有得到根本解决。现在无论是陆地、海洋还是太空用户都可以通过 GPS 全天候、在全球任何位置精确定位他们的三维坐标、速度和时间,其定位精度比目前以及将来的任何无线导航系统都要高。尤其是自从 2000 年 5 月 1 日,美国政府宣布停止人为降低 GPS 信号有效性的技术政策(SA 政策),使标准定位服务精度重新回到 25m 左右,此举大大促进了 GPS 技术在民用领域的应用。

GPS 由三大部分组成:空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分组成。接收机是用户部分的核心,我国在卫星设计和航天测控领域均取得了长足的进步,但在导航接收机领域尚处于起步阶段^[4];同时,开发新一代的全球导航系统,导航接收机的研究有着举足轻重的作用。伴随着 GPS 卫星的升级换代,GPS 接收机也已经经过了 20 多年的发展历史。第一代接收机主要使用模拟器件,体积庞大,需要较大功率。随着 1989 年开始的第二代 GPS 卫星(Block II)的发射,模拟信号处理被数字微处理器和集成电路取代,目前,广泛使用的 GPS 接收机一般均基于 ASIC(Application Specific Integrated Circuits)结构,将其称为硬件接收机,如图 1.1 所示。

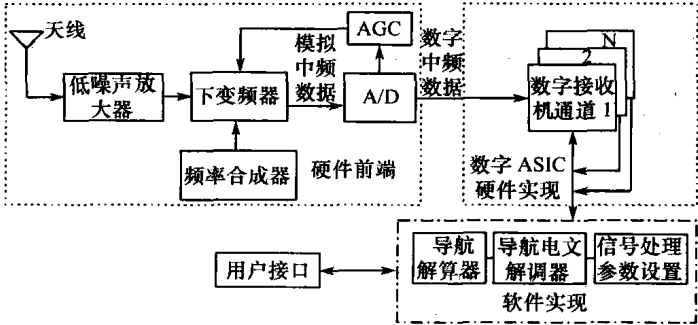


图 1.1 基于 ASIC 结构的硬件接收机

对于 ASIC 接收机,设计较为固定,用户不能改变接收机各类参数以适应不同导航信号处理的需要。同时,在接收机研究领域,

近年来出现很多新的缓解和降低 GPS 误差和干扰的信号处理算法^[5],例如,高灵敏度信号捕获技术^[6]、高动态的跟踪环路设计^[7]、抗多径跟踪环路设计^[8]等。对于 ASIC 结构接收机,测试和使用新的算法,不便之处显而易见。虽然随着软件无线电(Software Defined Radio)技术的飞速发展,这类情况有所改变;但要真正做到灵活控制,只需做较小改动就可以适应不同信号,能够迅速分析、仿真、实现各类算法,设置捕获、跟踪的各种参数和门限^[9],软件接收机(Software GNSS Receiver)关键技术的研究仍然任重而道远。

1.2 卫星导航系统概述

1.2.1 GPS

GPS 计划自 1973 年起步,1978 年首次发射卫星,1994 年完成 24 颗中轨道(MEO)卫星组网,共历时 16 年、耗资 120 亿美元。至今,已先后发展了 2 代卫星,共发射了 41 颗。目前,在轨工作卫星有 28 颗,其中还发射成功 2 颗新型的 2R 型卫星,还将发射 19 颗,总共耗资 190 亿美元。从 2003 年开始计划部署 33 颗 2F 型卫星。此外,现在又开始了全改进型 GPS III 的概念研究,以适应 2030 年未来的系统级要求。

GPS 由美国国防部运作,美国政府为了加强其在全球导航市场的竞争力,已于 2000 年 5 月 1 日午夜撤销对 GPS 的 SA 干扰技术,标准定位服务定位精度双频工作时实际可提高到 20m、授时精度提高到 40ns,并承诺以后逐步增加两个民用频率,即 L2 增加 C/A 码和民航安全专用的 L5(频率为 1176MHz),希望以此来抑制其他国家建立与其平行的另一个系统,并提倡以 GPS 和美国政府的增强系统作为国际使用的标准。美国为保持其独家利用卫星导航系统的军事优势,提出了导航战的战略方针。其内容在战时包括 3 个方面:对战区内抑制民用信号,例如,施放干扰和恢复 SA 手

段,拒绝敌方使用其所有有用导航功能;确保本方使用,加强反干扰、反欺骗能力和抗摧毁能力,例如,加大 P(Y) 功率,在 L1 和 L2 上增加 M 码,并已开发出军码在民用码受干扰和关闭时的独立捕获的自我生存能力,增加星间链路和提高卫星原子钟频率长期稳定度以增加星座自主导航能力,导航接收机采用可控方向图天线,对多个干扰源方向形成天线方向图零点以降低干扰能量等;虽宣称要保留战区以外的民间应用,但波及的范围估计不可能太小。

GPS 定位技术是利用高空中的 GPS 卫星,向地面发射 L 波段的载频无线电测距信号,由地面上用户接收机实时地连续接收,并计算出接收机天线所在的位置。因此, GPS 是由以下 3 个部分组成(图 1.2):

- (1) GPS 卫星星座(空间星座部分);
- (2) 地面监控系统(地面监控部分);
- (3) GPS 信号接收机(用户设备部分)。

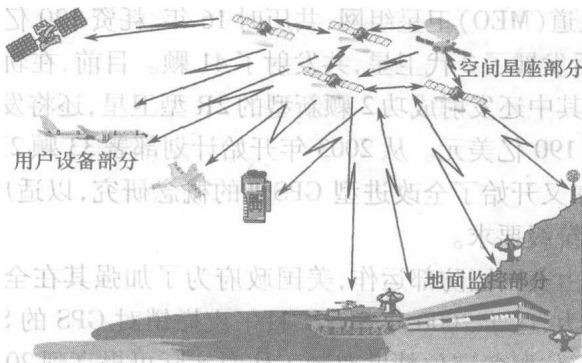


图 1.2 GPS 组成示意图

这三部分有各自独立的功能和作用,对于整个 GPS 来说,它们都是不可缺少的。卫星星座包括 24 颗在轨卫星,它向用户设备提供测距信号和数据电文。地面测控网完成对空间卫星的跟踪和维护,监视卫星的状态和完好性,并精密确定卫星的轨道。用户设备完成导航、授时和其他有关的功能(如测绘)。下面将对系统每

个部分做进一步详细介绍。

1.2.1.1 GPS 空间卫星星座

在 GPS 中, GPS 卫星具有以下作用:

(1) 向广大用户连续不断地发送导航定位信号, 用导航电文报告自己的现时位置, 以及其他在轨卫星的概略位置。

(2) 在飞越注入站上空时, 接受由地面注入站用 S 波段发送来的导航电文和其他有关信息, 供实时转发给地面上广大用户。

(3) 接收地面主控站通过注入站发送到卫星的调度命令。

卫星星座由额定 24 颗卫星的星座构成。卫星位于 6 个地心轨道平面内, 每个轨道 4 颗卫星。GPS 卫星的额定轨道周期是半个恒星日, 即 11h 58min。各轨道接近于圆形, 而且沿赤道以 60° 间隔均匀分布, 相对于赤道面的额定倾斜角为 55° 。图 1.3 所示为 GPS 卫星的星座。轨道半径(即从地球质心到卫星的额定距离)大约为 26600km。这一卫星星座具有为全球用户提供 24h 导航和时间确定能力。

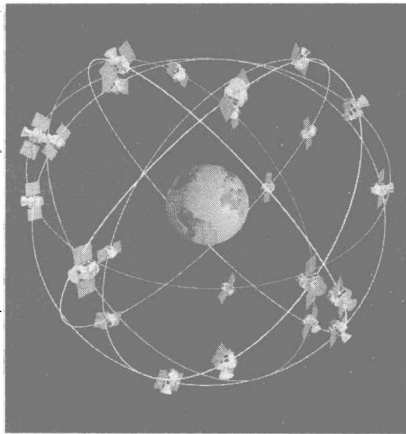


图 1.3 GPS 卫星星座

GPS 卫星每条轨道的斜率表示相对于地球赤道平面的倾斜角, 其额定值为 55° 。轨道平面相对于地球的位置由升交点的经度来确定, 而卫星在轨道平面内的位置由平均近点角来规定。升