

GNSS

Single Frequency Software Receiver Development and Applications

GNSS

单频软件接收机 应用与编程



易维勇 董绪荣 孟凡玉 郭晶 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

GNSS 单频软件接收机 应用与编程

易维勇 董绪荣 孟凡玉 郭 晶 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书面向应用与编程设计,针对卫星导航信号的分析 and 处理,系统地介绍全球卫星导航系统(GNSS)软件接收机技术的相关理论与方法。主要内容分四部分:一是卫星导航系统及卫星运动基本理论;二是卫星导航信号及其捕获、跟踪、处理;三是距离测量计算及导航定位解算;四是干扰与抗干扰技术等。每一部分都附有练习题,另外本书所附光盘是全部 Matlab 源程序以及 C++ 源程序。

本书体系完整、并尽量自成一统,以便读者能参考本书获得较全面的知识。可供航空、航天、航海、测控、测绘、地理、交通、规划、遥感等领域中从事卫星导航定位专业的工程技术人员和有关院所的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 单频软件接收机应用与编程 / 易维勇等编著.
—北京:国防工业出版社,2010.4
ISBN 978-7-118-06644-9

I. ①G... II. ①易... III. ①卫星导航—全球定位系统—接收机—程序设计 IV. ①TN967.1②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 036493 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)

北京四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 11 字数 288 千字

2010 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 29.00 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

卫星导航定位技术在军事和民用各领域、各行业都得到了广泛应用,这项技术本身也得到了飞速发展。全球卫星导航系统(GNSS)软件接收机技术是卫星导航领域的一个重要研究方向。目前,在理论上和实际工程应用中都取得了一定进展。作为一门交叉学科,软件接收机技术将会在很多行业得到更广的应用和发展。

本书面向应用与编程设计、在参考国内外论著的基础上,结合作者自己的研究成果撰写。内容上由浅入深,第一章介绍了 GNSS 软件接收机的研究背景和各種卫星导航系统。第二章介绍了信号处理的一些相关概念。第三章介绍了卫星运动的基本理论。第四章研究 GNSS 信号,包括伪随机码信号、导航电文,着重以 GPS 和 Galileo 系统为例进行讨论。第五章研究了 GNSS 接收机的前端技术,包括天线和信号下变频原理。第六章探讨卫星信号的捕获技术。第七章讨论卫星信号的跟踪、解调和伪距计算。第八章探讨导航定位解算方法。第九章简要介绍了 GNSS 干扰和抗干扰技术。第十章为实用编程实践。

本书结合最新的有关研究成果,以便读者能参考本书获得较全面的知识。当然,也不可能面面俱到,读者在阅读本书时,需要有数字信号处理、自动控制以及卫星导航的相关知识。本书还给出了一些练习题目,帮助读者理解各部分的内容,另外还给出了 Matlab 源程序以及 C++ 源程序,可帮助相关研究人员加快研究进度。适合各大专院校的教師、研究生、以及相关科研人員和高层次的 GNSS 研究人員参考使用。

本书着眼于介绍目前发展迅速的软件接收机技术,为相关领域的专业研究人员提供尽可能多的参考。由于本书主要针对卫星导航信号的分析 and 处理,对于信号处理的基本原理部分只做了简要介绍。因此,读者在阅读本书前,需要对信号处理有一定程度的掌握。

本书相关研究成果得到了国家自然科学基金的资助(项目号 40874007,40674014 和 40644020),感谢吕志伟副教授,第十章部分内容是本书作者与他合作研究的一个项目的成果。特别感谢王晓贞、易天健对本书的大力支持。

本书在撰写和出版过程中也得到了赵洪利、满强、李东华、张展、单玉泉等的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

我们诚恳地对在编写过程中所参阅文献的作者表示谢意。本书不妥和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2009 年 2 月

目 录

第一章 引言.....	1
第一节 背景.....	1
第二节 软件接收机与硬件接收机的比较.....	9
第三节 应用前景	12
练习题	12
第二章 信号处理基础	14
第一节 基本概念	14
第二节 调制方式	21
第三节 采样	22
Matlab 程序	24
练习题	30
第三章 卫星导航基础	32
第一节 时间系统	32
第二节 坐标系统	44
第三节 二体问题	49
第四节 卫星受摄运动	53
第五节 卫星定位原理	58
Matlab 程序	60
练习题.....	112

第四章 GNSS 信号	114
第一节 GPS 信号	114
第二节 Galileo 系统信号	127
第三节 利用伪随机码确定伪距	143
Matlab 程序	145
练习题	155
第五章 天线和前端	157
第一节 天线	157
第二节 前端	162
Matlab 程序	171
练习题	174
第六章 捕获	176
第一节 串行捕获	178
第二节 并行频率捕获	181
第三节 并行码相位捕获	185
第四节 捕获若干问题讨论	188
Matlab 程序	190
练习题	195
第七章 跟踪	197
第一节 解扩和解调原理	198
第二节 锁相环	203
第三节 跟踪环路	209
第四节 多路径效应	217
第五节 导航电文解调	220

第六节 卫星位置计算和星历重建·····	226
第七节 伪距计算·····	236
Matlab 程序·····	239
练习题·····	246
第八章 导航解算·····	248
第一节 观测方程·····	248
第二节 精度评定·····	252
第三节 用户速度计算·····	255
Matlab 程序·····	256
练习题·····	259
第九章 GNSS 干扰与抗干扰·····	261
第一节 GNSS 干扰·····	263
第二节 GNSS 抗干扰·····	265
Matlab 程序·····	267
第十章 实用编程·····	269
第一节 概述·····	269
第二节 整数 Fourier 变换 C++ 编程·····	273
第三节 利用卫星位置估计星历参数·····	279
英语缩略语·····	336
参考文献·····	337

第一章 引 言

目前,GNSS 接收机经过多年的发展,在技术上取得了很大的进步,尤其在高端的科学和工程应用中,其功能越来越强大,能同时接收所有可见卫星信号,实现低噪声测量及无码与半无码 L2 信号的跟踪。在低端应用中,手持导航接收机的价格降到 100 美元以下,具备了大批量进入大众化应用的条件,手表型导航仪也已进入市场,与无线移动通信结合的定位手机也业已出笼,个人应用市场展现了不可逆转的发展前景。许许多多的应用拓广都归功于 GPS 接收机数字技术的进步。数据记录技术也有明显发展,从原来的磁带和软盘,变成价廉物美的闪存或半导体存储器,体积也越来越小。

然而,对于很多测量和导航工作者来说,GNSS 接收机都是作为一个黑匣子。接收机接收到卫星信号,将卫星信号转换为伪距、载波相位、多普勒频移以及位置速度等过程,很多研究人员对此不是很了解。大部分工程技术人员只是利用接收机的输出做数据的处理,至于接收机内部是如何工作的则无从知晓。为了给测量和导航工作者提供一些接收机的参考,本书系统介绍了 GNSS 接收机前端设计需要考虑的问题,包括信号的捕获和跟踪、导航电文解调、伪距的计算和导航位置计算。

第一节 背 景

目前,现有的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)主要包括美国的全球定位系统(Global Positioning

System, GPS)、俄罗斯的 GLONASS, 以及正在研制和部署的我国北斗二代导航系统和欧洲的 Galileo 系统。

1. GPS

GPS 是美国国防部历经 20 年开发的星基全球无线电导航系统, 耗资超过 300 亿美元, 是继阿波罗登月计划和航天飞机计划之后的第三项庞大的空间计划。其目标为实时地提供三维位置、三维速度和高精度的时间信息, 从根本上解决人类在地球上的导航和定位问题, 以满足各种不同用户的需要。该系统为军民两用系统, 可为全球范围内的飞机、舰船、地面部队、车辆、低轨道航天器提供全天候、连续、实时、高精度的三维位置、三维速度以及时间数据。GPS 是世界上第一个成熟、可供民用的全球卫星导航定位系统, 在全球范围内得到了广泛应用。

GPS 由 24 颗地球中轨卫星组成, 均匀地分布在距离地球 20000km 高空的 6 个轨道面上。这些卫星与地面支撑系统组成网络, 连续向全球用户播报其位置(经纬度)、速度、高度和时间信息, 能使地球上任何地方的用户在任何时候都能利用 GPS 接收机同时收到至少 4 颗卫星的位置信息, 应用差分定位原理计算确定自己的位置。因此, 这是一个全天候、实时性的导航定位系统。

GPS 是自“子午仪”系统之后, 美国国防部从 20 世纪 70 年代初开始研制的采用时间测距卫星导航方式的第二代导航卫星系统。初始作用是为美国军方在全球的舰船、飞机导航并指挥陆军作战。第一颗 GPS 卫星于 1978 年 10 月 6 日发射, 1993 年 12 月完成 24 颗卫星组网, 1995 年 4 月 27 日达到完全运行水平。目前, GPS 卫星发展了两代三种型号, 现在轨道运行的为第二代的两种型号: GPS-2A 和 2R, 卫星寿命约为 7.5 年。

GPS 系统提供了两种定位信号, 一种是 C/A 码(Coarse Acquisition, 也称为粗捕获码), 由标准定位信号经干扰而成, 定位精度在 100m 左右, 以供民间用户使用; 另一种即所谓的 P 码(Precise

Code, 也称为精码), 经加密后发播, 以供军用, 定位精度在 3m 以内。GPS 接收机与手提电话大小相当, 体积很小, 可方便地装载在汽车等航行器上。

美国发展 GPS 的主要目的是为军事服务, 其次才是民用, 其发展战略是在重要的军用与民用领域独霸全球, 保持技术上遥遥领先, 推行美国 GPS 标准占领和垄断全球市场。所以, GPS 本质上是军用系统, 由美国军方控制, 优先为军方服务。长期以来, 美国对本国军方提供的是精确定位信号, 对其他用户提供的则是加了干扰的低精度信号。从 1991 年的海湾战争开始到现在, 美国的一切军事行动几乎都与卫星定位系统有关, GPS 接收机装备至每一个参战单位甚至个人; 地空导弹、巡航导弹采用 GPS 精确制导后, 精确打击能力大大提高。美国向民用用户和外国只提供低精度的卫星信号, 使用的标准定位服务精度以前为 100m, 为了保持其在全球导航市场的垄断地位, 美国克林顿政府决定施行无偿向民用领域提供高精度定位信号的方针, 已于 2000 年 5 月 1 日午夜撤销对 GPS 的 SA 干扰技术, 民用领域也能获得与军用相同的 10m 定位精度。但在危机和战争期间, 军方控制的机构将保护美国及其盟友安全使用 GPS; 阻断敌方使用卫星导航信号, 采取局部干扰或故意降低导航定位精度等, 甚至随时可以关闭这种服务。例如, 在海湾战争时, 美国曾置欧盟各国利益不顾, 一度关闭对欧 GPS 服务。

2. GLONASS

俄罗斯的 GLONASS (GLObal NAvigation Satellite System) 是前苏联国防部从 20 世纪 80 年代初开始建设的与美国 GPS 相抗衡的全球卫星导航系统, 与 GPS 系统原理、功能十分类似, 耗资 30 多亿美元, 1995 年投入使用, 现在由俄罗斯联邦航天局管理。

GLONASS 在 1995 年完成 24 颗中高度圆轨道卫星加 1 颗备用卫星组网, 成为世界上第二个独立的军民两用全球卫星导航系统。该系统由卫星星座、地面监测控制站和用户设备三部分组成。

卫星星座由 24 颗工作星和 3 颗备份星组成,均匀地分布在三个近圆形的轨道面上,每个轨道面有 8 颗卫星,轨道高度为 19100km。18 颗卫星就能保证该系统为俄罗斯境内用户提供全部服务。地面支持系统原来由苏联境内的许多监控站完成,随着苏联的解体, GLONASS 的地面支持已经减少到只有俄罗斯境内的场地了,系统控制中心和中央同步处理器位于莫斯科,遥测遥控站位于圣彼得堡、捷尔诺波尔、埃尼谢斯克和共青城。GLONASS 单点定位精度水平方向为 16m,垂直方向为 25m。与美国的 GPS 不同的是, GLONASS 采用频分多址(FDMA)方式,根据载波频率来区分不同卫星(GPS 是码分多址(CDMA),根据调制码来区分卫星)。俄罗斯对 GLONASS 采用了军民合用、不加密的开放政策。与美国的 GPS 相比, GLONASS 导航精度相对较低,应用普及情况远不及 GPS,其最大优点在于抗干扰能力强。

GLONASS 卫星设计工作寿命只有 3 年,系统建成后原来在轨卫星陆续退役,系统的大部分卫星老化,俄罗斯由于财政困难,航天拨款严重不足,无法发射足够的新卫星取代已到寿命的卫星,以致到 20 世纪 90 年代后期工作卫星数量减少到不足 10 颗,已不能独立组网,事实上陷入功能不完善的状态,只能与 GPS 联合使用。

2003 年的伊拉克战争对俄罗斯产生了相当大的震动,迫使俄罗斯领导层再次对太空的军事用途重视起来。俄总统普京多次强调重视发展独立的全球定位系统,表示 GLONASS 对于国防和经济发展的意义极为重大,俄罗斯决不会放弃 GLONASS;2005 年,指示要求 2007 年恢复该系统独立工作,开拓广大的民用市场,并为该系统拨款 36 亿卢布,列为俄国防部优先发展项目之一。俄政府计划用 4 年时间将 GLONASS 修复,更新为 GLONASS - M,预计到 2007 年使 GLONASS 的工作卫星数量至少达到 18 颗的最低水平,全面开始运转,为俄罗斯用户提供导航定位服务。整个系统在 2009 年—2011 年完成全部 24 颗卫星的部署,届时导航范围可覆盖整个地球表面和近地空间,开始为全球用户提供导航服务,定位精度可达 1m,足以与美国的 GPS 相媲美。计划包括发射新一代

的 GLONASS - M 卫星(工作寿命为 7 年)和 GLONASS - K 型卫星(工作寿命为 10 年),逐渐替代老式卫星,完成该系统卫星的新老更替和升级。截至 2005 年 12 月底,俄新发射了 9 颗 GLONASS 卫星,使该系统在轨卫星数量达到 17 颗。GLONASS 历年工作卫星数及未来几年的发射计划如图 1.1 所示。

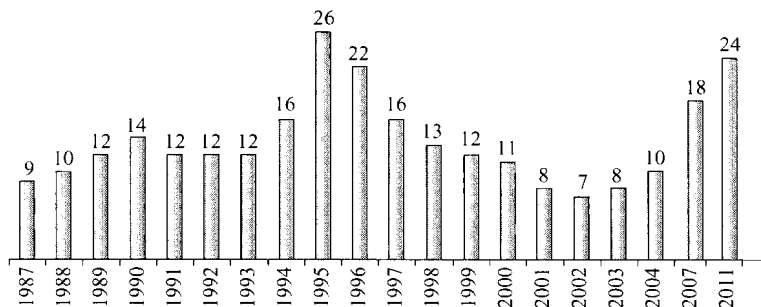


图 1.1 GLONASS 在轨工作卫星数

3. Galileo 系统

1999 年,欧洲提出了建立 Galileo 导航卫星系统的计划。经过长时间的酝酿,2002 年 3 月 26 日,欧盟 15 国交通部长会议一致决定,正式启动 Galileo 导航卫星计划,这标志着欧洲将拥有自己的卫星导航定位系统,结束美国 GPS 独占鳌头的局面。该系统经费预算为 32 亿欧元~36 亿欧元,由欧空局成员国和欧洲工业界等联合投资,费用公方和私方各占 50% 左右。与 20 世纪 70 年代美国建成的 GPS 系统花费了 130 亿美元相比,Galileo 系统的建设是一个经济、实用、高效、先进的系统。

Galileo 系统的性能极为先进。按照欧洲目前的设想, Galileo 系统定位精度可达厘米级。如果说 GPS 只能找到街道, Galileo 系统则可找到车库门。 Galileo 系统为地面用户提供三种信号: 免费使用的信号、加密且需交费使用的信号、加密且需满足更高要求的信号。其精度依次提高,最高精度比 GPS 高 10 倍,即使是免费使

用的信号精度也达到 6m。另外, Galileo 系统的另一个优势在于,它能够与美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 实现多系统内的相互兼容。Galileo 系统的接收机可以采集各个系统的数据或者通过各个系统数据的组合来实现定位导航的要求。

由于 GNSS 导航系统要满足很多方面的应用,如在森林里或室内导航,需要对信号进行精心的设计,以满足各种应用需求。Galileo 系统除能提供精确的定位信号外,还可以提供移动电话业务服务,用于救生行动,如接收失事飞机的求救信号后,快速通知附近的救援部门,这些是 GPS 所无法实现的。毫无疑问, Galileo 系统是 GPS 的强有力的竞争对手,较之与已形成垄断地位的 GPS, Galileo 系统由于采用了许多新技术而更加灵活、全面、可靠,可以提供完整、准确的数据信号。较高的功率使 Galileo 系统的信号可以很容易克服干扰和进行接收,还可以为高纬度地区以及中亚和黑海地区提供较好的数据。

Galileo 系统的卫星星座是由分布在三个轨道上的 30 颗中高度轨道卫星(MEO)构成,具体参数如下:

每条轨道卫星数量为 10 颗(9 颗工作,1 颗备用);卫星分布在 3 个轨道面上;轨道倾斜角为 56° ;轨道高度为 24000km;运行周期为 14h4min;卫星寿命为 20 年;卫星质量为 625kg;电量供应为 1.5kW;射电频率为 1202.025MHz、1278.750MHz、1561.098MHz、1589.742MHz。卫星数量与卫星的布置和美国 GPS 的星座有一定的相似之处。

中轨卫星装有的导航有效载荷包括以下几种:

(1) Galileo 系统所载时钟有两种类型,即铷钟和被动氢脉塞时钟。在正常工作状况下,被动氢脉塞时钟将被用作主要振荡器,铷钟也同时运行作为备用,并时刻监视被动氢脉塞时钟的运行情况;

(2) 天线设计基于多层平面技术,包括螺旋天线和平面天线两种,直径为 1.5m,可以保证低于 1.2GHz 和高于 1.5GHz 频率的波段顺利发送和接收;

(3) Galileo 系统利用太阳能供电,用电池存储能量,并且采用了太阳能帆板技术,可以调整太阳能帆板的角度,保证吸收足够阳光,既减轻卫星对电池的要求,也便于卫星对能量的管理;

(4) 射频部分通过 50W ~ 60W 的射频放大器将四种导航信号放大,传递给卫星天线。

地面部分主要完成两个功能:导航控制和星座管理功能以及完好性数据检测和分发功能。

导航控制和星座管理功能由地面控制部分(GCS)完成,主要由导航系统控制中心(NSCC)、OSS 工作站和遥测遥控中心(TCC)三部分构成。其中,OSS 工作站共 15 个,无人监管并且只能接收星座发出的导航电文和星座运行环境数据,并把数据传送到导航系统控制中心,由导航系统控制中心检测和处理;分布在 4 点的遥测遥控系统接收导航系统控制中心中卫星控制设备(SCF)提供的导航数据信息,并上传到星座。

完好性数据检测和分发功能主要由欧洲完好性决策系统(EIDS)完成,EIDS 主要由完好性监视站(IMS)、完好性注入站(IU-LS)和完好性控制中心(ICC)三部分组成。其中,无人照管的完好性监视站网络接收来自星座的 L 波段,用来计算 Galileo 系统完好性的原始卫星测量数据;完好性控制中心包括完好性控制设备、完好性处理设备和完好性服务接口,用来接收完好性监视站的数据,并发送数据到完好性注入站,由完好性注入站将数据以 S 波段发送到星座上。GCS 和 EIDS 之间,通过 ICC 和 NSCC 可进行数据通信。

Galileo 系统提供的服务有以下几种:

(1) 公开服务(Open Service, OS)。Galileo 系统的公开服务能够免费提供用户使用的定位、导航和时间信号。此服务对于大众化应用,如车载导航和移动电话定位,是很适合的。当用户处在一个固定的地方时,此服务也能提供精确时间服务(UTC)。

(2) 商业服务(Commercial Service, CS)。商业服务相对于公开服务提供了附加的功能,大部分与以下内容相关联。

- ① 分发在开放服务中的加密附加数据;
- ② 非常精确的局部差分应用,使用开放信号覆盖 PRS 信号 E6;
- ③ 支持 Galileo 系统定位应用和无线通信网络的良好性导航(或导航)信号。

(3) 生命安全服务(Safety of Life, SOL)。生命安全服务的有效性超过 99.9%。Galileo 系统和当前的 GPS 系统相结合,将能满足更高的要求,包括船舶进港、机车控制、交通工具控制、机器人技术等。

(4) 公众规范服务(Public Regulated Service, PRC)。公众规范服务将以专用的频率向欧共体提供更广的连续性服务,主要包括以下几种:

- ① 用于欧洲国家安全,如一些紧急服务、其他政府行为和执行法律;
- ② 一些控制或紧急救援,运输和电信应用;
- ③ 对欧洲有战略意义的经济和工业活动。

(5) 局域设施提供的导航服务。局域设施能对单频用户提供微分修正,使其定位精度值优于 $\pm 1\text{m}$,利用 TCAR 技术可使用户定位的偏差在 $\pm 10\text{cm}$ 以下;公开服务提供的导航信号,能增强无线电信定位网络在恶劣条件下的服务。

其他卫星导航系统还有如中国的北斗导航系统,印度的 IRNSS(Indian Regional Navigational Satellite System)和日本的 QZSS(Quasi-Zenith Satellite System)。

卫星导航系统是一项复杂的工程,其组成部分包括空间卫星部分、地面控制部分以及用户接收机等。服务端(包括空间卫星部分和地面控制部分)需要巨大的投入费用,由国家进行投资。要收回投资,须进一步研究用户端的可用技术,拓宽 GNSS 系统的应用。因此,用户端接收机的研究是国际上 GNSS 研究的热点之一。而软件接收机则由于其灵活性和巨大的市场潜力,更是被很多制造商和研究机构所看好,如美国宇航局 NASA 以及多所大学、

丹麦的 Aalborg 大学、德国国防军大学、日本的东京大学等都在进行这方面的研究。

随着军用和民用的需求越来越多,我国对 GNSS 的投入也越来越多,如投入巨大的财力和人力研制我国的“北斗”二代导航系统。在我国的 GNSS 投入运行后,如何着眼军民结合、以民养军的战略,使“北斗”二代导航系统实现资金流的良性循环,是我国 GNSS 产业的战略目标之一。这就要求科研人员在用户端进行进一步的研究,拓宽应用范围,降低用户端的成本,最大限度的占领市场。

第二节 软件接收机与硬件接收机的比较

传统的硬件接收机的结构如图 1.2 所示。射频信号经天线接收后,由射频前端进行混频和滤波,然后经模拟/数字转换得到数字信号。采用专用集成电路 (Application Specific Integrated Circuit, ASIC) 或可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 实现信号的捕获和跟踪。得到各种观测量后经专用或通用的计算机芯片计算可得到导航结果。由该结构示意图可知,硬件接收机对 GNSS 信号信号处理通过硬件来完成,这就影响了接收机的灵活性,如当卫星发射的信号结构发生变化时,或需要接收新的卫星导航信号时,须更换接收机内部的硬件或专用芯片,才能捕获

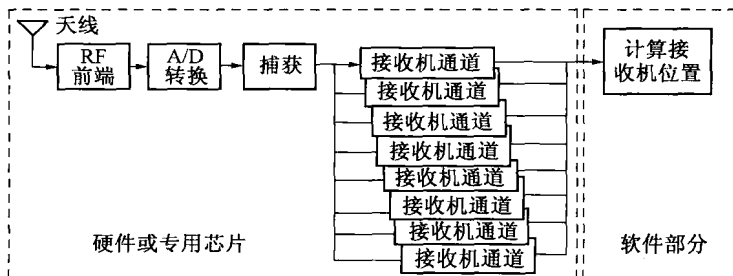


图 1.2 硬件接收机结构示意图