



GPS Principles and Its Matlab Simulation

GPS基本原理及其 Matlab仿真

❖ 杨俊 武奇生 编著



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

GPS 基本原理及其 Matlab 仿真

杨 俊 武奇生 编著

西安电子科技大学出版社

2006

内 容 简 介

本书讲述了全球定位系统(GPS)的基本原理和概念,具体包括:GPS测量原理、GPS的结构和发展历史;GPS伪距定位和载波相位定位的原理;GPS中使用的坐标系和时间系统;C/A码的实现原理及载波调制过程;GPS信号捕获和跟踪原理及实现;便携式GPS系统的设计与实现及常用芯片资料等。此外,本书还讲述了利用Matlab仿真GPS中涉及到的各种算法和原理,并且给出了所有仿真源程序和仿真框图。利用Matlab仿真,读者可以更好地理解GPS中的关键技术,这是本书的特点。

本书可作为高等院校导航、通信、测量和测绘等专业的高年级学生或研究生的GPS课程教材,同时也可供相关专业师生及研究人员阅读参考。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

GPS基本原理及其Matlab仿真/杨俊,武奇生编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2006.8

ISBN 7-5606-1723-9

I. G… II. ①杨… ②武… III. ①全球定位系统(GPS)—理论 ②全球定位系统(GPS)—计算机仿真 IV. P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第082352号

责任编辑 雷鸿俊 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail:xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2006年8月第1版 2006年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张13

字 数 303千字

印 数 1~4000册

定 价 20.00元

ISBN 7-5606-1723-9/TN·0347

XDUP 2015001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)即 GPS 系统,是 20 世纪 70 年代由美国国防部研制的新一代卫星导航定位系统,向全球范围内的用户全天候提供高精度的导航、定位和授时服务。目前, GPS 已在地形测量、交通管理、导航、野外勘探等领域得到了广泛的应用。随着 GPS 应用领域的迅速扩展,人们急切地需要掌握 GPS 的相关知识。目前,国外许多大学已为学生开设了 GPS 课程,包括电子通信、导航、地理测量等专业;国内大学也有这种趋势。

另一方面, GPS 系统涵盖了许多技术领域,如涉及导航卫星的轨道控制(天体力学),卫星如何向 GPS 接收机发送导航信息(天线、卫星通信), GPS 的定位原理(各种数值求解算法),卫星信号的捕获和跟踪的实现(DSP 算法的应用)等。GPS 系统为我们的学习提供了一个范例,可以说通过 GPS 系统的学习,可以更深入地理解上述领域的关键技术。GPS 系统将上述领域有机地融为一体:全球范围、全天候的定位要求决定了卫星的轨道、分布,而卫星的轨道、分布及卫星上使用的太阳能技术又制约了如何向地面接收机传送信号,进一步决定了接收机的设计以及如何实现卫星信号的捕获和跟踪。通过整个系统的学习,我们可以“逆向”揣摩当时系统设计者的整体思路,这无疑可促使工科学生系统性、工程化地考虑问题。

然而,没有很好的学习方法是难以达到上述目的的。目前,虽然有一些讲述 GPS 系统的书籍,但是缺乏使学生深入学习的例子和方法,只能让学生被动地学习、记忆。本书的目的在于为学生提供参与教学的环节,具体的方法是将 GPS 系统中典型的算法、技术方案用 Matlab 仿真实现,最后介绍了一个廉价的嵌入式手持 GPS 接收机方案,鼓励学校引导学生使用,并在上面进行二次开发(如结合电子地图实现导航)。

用 Matlab 仿真作为教学的补充和延伸目前正在成为一种潮流。让学生实现 GPS 系统关键技术的仿真主要有以下作用:(1) 检验是否掌握 GPS 核心算法和理论。GPS 中的复杂算法只有计算机编程才能实现,仿真若能达到预想的要求,则证明学生较好地掌握了这些算法。(2) 仿真可以更好地鼓励学生思考,例如在讲述了 GPS 卫星轨道、分布后,在仿真以后可以引导学生思考:在某特定位置、特定时间段可以接收到的 GPS 卫星信号有哪些?如果某颗卫星信号缺失,能在哪些区域内造成“盲区”? 这些问题只有通过计算机的计算才能迅速求解。经过这些环节的练习,将增强学生的科研能力,并为进一步的学习(GPS 或相近领域)打下良好的基础。

此外,本书注重基本概念的学习,采用循序渐进的方法讲述。例如,在讲述用线性化方法求解用户坐标时,首先讲述了牛顿切线法,然后将其拓展到多个变量的求解,这样读者便很容易掌握。对于一些核心算法所涉及的数学知识,书中给出了必要的证明。我们的证明力图使读者掌握核心的算法思想,而不过于追求某些数学上的严密推导。这样,不需参考其他文献,读者(大学高年级及其以上程度)便可以自学。因此本书还具有自成体系的特点。

本书的主要内容如下:

第1章:介绍了GPS基本原理、系统结构和发展历史,此外讲述了Matlab的基本知识和矩阵的使用(如果掌握一门计算机语言,可以很快地掌握Matlab中诸如循环、赋值等共有的内容,对此给予简单的介绍;而矩阵的使用是Matlab特有的,因此予以较为详细的介绍)。

第2章:讲述了GPS定位原理和重要概念。重点在于“伪距”、“钟差”等概念的介绍和如何通过4颗卫星信号接收实现定位,并补充了最小二乘法的矩阵推导和线性化求解多元二次方程的知识。

第3章:讲述了GPS中使用的坐标系和时间系统,包括协议天球坐标系和协议地球坐标系以及GPS的时间系统。在此基础上,介绍了GPS卫星轨道方面的知识,包括开普勒定律、描述卫星姿态的轨道参数,以及卫星星历的相关知识。

第4章:讲述了卫星信号的特点和如何通过伪随机码实现伪距测量,以及扩频通信和伪随机二进制码的基本理论。最后讲述了如何修正卫星信号传输中产生的主要误差。

第5章:讲述了接收机捕获卫星信号的过程和关键算法,以及算法中使用的频谱分析技术和信号相关的快速算法。

第6章:讲述了接收机跟踪卫星信号的过程和关键算法,以及算法中使用的锁相环技术和码跟踪技术。

第7章:介绍了各种GPS接收机的实现方案。重点讲述了用常用仪器搭建软件GPS接收机的思路 and 系统实现,并用硬件实现了一个廉价的嵌入式手持GPS接收机,以及在上面进行二次开发(如结合电子地图实现导航)的设计方案。

此外,我们提供了实现GPS系统仿真的Matlab源代码和思考题的算法提示,并提供了第7章涉及的嵌入式手持GPS接收机的电路结构框图和实现要点。

本书在编写过程中,扈建军同志提供了重要技术资料,同时得到了吴婷婷、吴青云、姚博彬、李梁、李扬、石淑娟、黄少菊等同学的协助,他们参与了部分文字的编辑、校对和图表的录入工作,在此表示感谢。

总之,本书的目的在于为学生提供参与教学、积极思考和动手操作的工具。相信通过对本书的学习,读者会较为深入地了解GPS系统的原理,掌握关键算法的实现,并具有一定的GPS硬件知识。

编者

2006年5月

目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 GPS 的发展简史及系统概述 | 1 |
| 1.2 GPS 的服务与应用 | 4 |
| 1.2.1 精密定位服务 | 4 |
| 1.2.2 标准定位服务 | 5 |
| 1.3 Matlab 的基本特性及基本语法 | 6 |
| 1.4 矩阵与 Matlab | 11 |
| 1.4.1 矩阵和向量 | 11 |
| 1.4.2 向量的创建 | 13 |
| 1.4.3 矩阵的创建 | 15 |
| 1.4.4 点运算 | 17 |
| 1.4.5 矩阵的数学运算 | 20 |
| 1.5 数据的输入与输出 | 23 |
| 1.5.1 字符串(文字)和注释的输出 | 23 |
| 1.5.2 用 INPUT 函数输入数据 | 26 |
| 1.5.3 数据文件的输入和输出 | 27 |
| 1.6 程序流程控制 | 28 |
| 1.6.1 程序流程控制概述 | 28 |
| 1.6.2 程序流程控制的实现 | 29 |
| 1.7 Matlab 函数 | 35 |
| 1.7.1 Matlab 函数概述 | 35 |
| 1.7.2 函数文件 | 36 |
| 1.8 编程练习 | 39 |
| 第 2 章 GPS 测量原理 | 42 |
| 2.1 利用到达时间测量值测距 | 42 |
| 2.1.1 二维位置确定 | 42 |
| 2.1.2 利用卫星测距信号确定位置的原理 | 45 |
| 2.2 参考坐标系 | 46 |
| 2.2.1 地心惯性(ECI)坐标系 | 46 |
| 2.2.2 地心地球固连(ECEF)坐标系 | 46 |
| 2.2.3 世界测地系(WGS-84) | 46 |
| 2.3 利用伪随机噪声(PRN)码确定位置 | 47 |
| 2.3.1 确定从卫星到用户的距离 | 47 |
| 2.3.2 用户位置的计算 | 50 |
| 2.4 GPS 载波相位测量定位 | 53 |
| 2.4.1 GPS 载波相位测量 | 53 |
| 2.4.2 GPS 载波相位测量的单点定位问题 | 57 |
| 附录 A 用户位置的求解仿真 | 60 |

| | |
|--|-----|
| 第 3 章 GPS 的坐标、时间系统和卫星的运动 | 66 |
| 3.1 天球坐标系和地球坐标系 | 66 |
| 3.1.1 天球概述 | 66 |
| 3.1.2 两种天球坐标系及其转换模型 | 68 |
| 3.1.3 极移与国际协议地极原点 | 71 |
| 3.1.4 两种地球坐标系及其转换模型 | 72 |
| 3.1.5 瞬时极(真)天球坐标系到瞬时极(真)地球坐标系的转换模型 | 74 |
| 3.1.6 WGS-84 世界大地坐标系 | 75 |
| 3.2 GPS 时间系统 | 76 |
| 3.2.1 世界时系统 | 77 |
| 3.2.2 原子时 | 78 |
| 3.2.3 力学时 | 79 |
| 3.2.4 协调世界时 | 79 |
| 3.2.5 GPS 系统时 | 79 |
| 3.3 GPS 卫星的运动 | 80 |
| 3.3.1 开普勒定律 | 80 |
| 3.3.2 无摄卫星运动的轨道参数 | 82 |
| 3.3.3 真近地点角的概念及求解 | 83 |
| 3.3.4 卫星瞬时位置的求解 | 85 |
| 3.3.5 卫星无摄运动轨道方程的力学解释及摄动的修正 | 86 |
| 附录 B GPS 卫星的动态仿真 | 90 |
| 第 4 章 GPS 卫星的导航定位信号 | 105 |
| 4.1 概述 | 105 |
| 4.2 GPS 卫星的测距码信号 | 107 |
| 4.2.1 码的基本概念 | 107 |
| 4.2.2 伪随机噪声码及其产生 | 108 |
| 4.2.3 GPS 的测距码信号 | 111 |
| 4.3 GPS 卫星的导航电文 | 115 |
| 4.3.1 导航电文格式 | 115 |
| 4.3.2 导航电文的内容 | 116 |
| 4.4 Matlab 仿真 C/A 码的产生及调制 | 119 |
| 第 5 章 GPS 卫星信号的捕获 | 126 |
| 5.1 概述 | 126 |
| 5.2 GPS 卫星信号的多普勒效应 | 126 |
| 5.3 GPS 卫星信号捕获的考虑 | 128 |
| 5.3.1 捕获时的最大电文长度 | 128 |
| 5.3.2 捕获中的频率步长 | 129 |
| 5.4 GPS 卫星信号的捕获方法 | 130 |
| 5.4.1 传统捕获方法 | 130 |
| 5.4.2 循环相关捕获方法 | 133 |
| 5.4.3 延迟与累积捕获方法 | 136 |
| 5.4.4 长记录电文的相干处理 | 138 |

| | | |
|--------------|------------------------------|------------|
| 5.4.5 | 精频估计的基本概念 | 139 |
| 5.4.6 | 消除精频测量中的不确定性 | 139 |
| 5.5 | Matlab 与 Simulink 仿真简介 | 142 |
| 5.5.1 | 仿真工具简介 | 142 |
| 5.5.2 | Simulink 的使用 | 142 |
| 5.6 | GPS 卫星信号捕获的例子 | 147 |
| 5.7 | 关于捕获的一些子程序 | 150 |
| 5.7.1 | 随机编码过程仿真 | 150 |
| 5.7.2 | 获取导航信息的仿真 | 153 |
| 5.7.3 | 模拟捕获延迟的仿真 | 157 |
| 附录 C | GPS 捕获仿真程序 | 160 |
| 第 6 章 | GPS 卫星信号的跟踪 | 164 |
| 6.1 | 概述 | 164 |
| 6.2 | 锁相环的基本理论 | 164 |
| 6.2.1 | 一阶锁相环 | 166 |
| 6.2.2 | 二阶锁相环 | 167 |
| 6.2.3 | 连续系统到离散系统的转换 | 168 |
| 6.3 | GPS 信号跟踪 | 169 |
| 6.3.1 | 载波和码元跟踪 | 169 |
| 6.3.2 | 利用锁相环跟踪 GPS 信号 | 170 |
| 6.3.3 | BASS 方法中的载波频率更新 | 171 |
| 6.3.4 | Kernel 函数的不连续性 | 172 |
| 6.3.5 | C/A 码起始点的精确性 | 175 |
| 6.4 | 跟踪过程的高测时精度 | 176 |
| 6.4.1 | 通过理想相关输出获得高测时精度 | 176 |
| 6.4.2 | 通过曲线拟合获得高测时精度 | 179 |
| 6.5 | BASS 跟踪过程的输出 | 180 |
| 6.6 | RF 与 C/A 码的混合 | 181 |
| 附录 D | 方程(6-26)的积分过程 | 181 |
| 第 7 章 | GPS 接收机及其电路 | 183 |
| 7.1 | GPS 接收机 | 183 |
| 7.1.1 | GPS 接收机的基本构成 | 183 |
| 7.1.2 | GPS 接收机的分类 | 185 |
| 7.1.3 | 数字 GPS 接收机 | 186 |
| 7.1.4 | GPS 接收机的选择 | 187 |
| 7.2 | 基于 RF8009 的 GPS 接收机电路 | 187 |
| 7.2.1 | RF8009 简介 | 187 |
| 7.2.2 | RF8009 的主要性能指标 | 187 |
| 7.2.3 | RF8009 模块封装与引脚功能 | 189 |
| 7.2.4 | RF8009 的内部结构 | 190 |
| 7.2.5 | RF8009 电路应用 | 190 |
| 7.2.6 | RF8009 封装尺寸 | 194 |
| 7.3 | 基于嵌入式系统的 GPS 应用设计 | 196 |

| | |
|------------------------|------------|
| 7.3.1 嵌入式系统比较 | 196 |
| 7.3.2 GPS应用开发的要求 | 197 |
| 参考文献 | 199 |

第1章 绪 论

1.1 GPS的发展简史及系统概述

GPS是全球定位系统(Global Positioning System)的英文缩写,它可以用来实现连续的实时三维导航。导航的定义是“引导运载体或人员从一个地方到达另一个地方的科学”。在日常生活中,我们每一个人都在进行某种形式的导航。开车去上班或步行去商店需要我们使用基本的导航技能。对于我们大多数人来说,这些技能需利用我们的眼睛、常识和地标。然而在一些情况下需要更精确地知道我们的位置、遵循的航向和到达所希望的目的地待航时间,此时便要用不同于地标的导航装置。这些导航装置也许仅仅是一个时钟,以确定经过已知距离的速度;或者是汽车里的里程表,以随时知道已跑过的距离。其他一些导航装置要复杂一些,而且要发射电子信号。这些导航装置称为无线电导航装置。

来自一个或多个无线电导航装置的信号,使人们(下文称之为用户)能够计算出其位置(某些无线电导航装置还提供速度确定和时间广播的能力)。重要的是要注意到,正是用户的无线电导航接收机在处理这些信号和计算用户位置。在一些应用中,有可能接收机只处理所接收到的信号,而由分离的处理器完成导航解算。

导航装置各式各样,通常可以把它们分为陆基和星基两大类。大多数陆基无线电导航装置,其精度与它们的工作频率成正比。高精度的系统一般在相对短的波长上发射,用户必须保持在视距之内。而在较低的频率(较长的波长)上广播信号的系统则不受视距的限制,但精度较低。

早期发展的星基系统有美国海军导航卫星系统(称为子午仪,即 Transit)和俄罗斯的 Tsikada 系统,它们提供二维的高精度定位服务。获得定位值的频度随纬度而变化。理论上在赤道上的子午仪用户平均每 110 分钟可获得一次定位,而在 80° 的纬度上定位速率将改善到平均每 30 分钟一次。这两种系统的缺点是,每一次定位都需要 10~15 分钟,用于接收机处理和用户位置评估。这样的特性适合于船用导航(因为其速度很低),而不适合于飞机和高动态用户。正是因为这些缺点,导致了美国的全球定位系统(GPS)和俄罗斯的全球导航卫星系统(GLONASS)的发展。

20 世纪 60 年代初期,几个美国政府机构包括军方、国家航空航天局(NASA)和交通部(DOT)都对发展用于定位的卫星系统产生了兴趣。从它们的观点看,最佳系统应有如下特性:全球覆盖,连续/全天候工作,能为高动态平台提供服务,高精度。子午仪于 1964 年投入运行后便被广泛接受,用于低动态平台。然而,由于其固有的缺陷,海军打算提高子午仪或者发展另一种卫星导航系统,使之具有上述希望的能力。约翰霍普金斯大学应用物理实验室的子午仪研究人员对原先的子午仪系统提出了几种改进建议。与此同时,海军研究实验室(NRL)进行了星载高稳定时钟的试验,以获得高精度的时间传递。这项计划记做

Timation。随后 NRL 又对 Timation 卫星作了修改，以提供进行二维定位的测距能力。Timation 使用单边带调制来进行卫星至用户距离的测量。

在考虑提高子午仪和进行 Timation 工作的同时，美国空军也在进行代号为 621B 系统的卫星定位系统的概念研究。他们设想 621B 系统的卫星将在倾斜角为 0° 、 30° 和 60° 的椭圆轨道上。在研究了各种卫星数量(15~20 颗)和它们的轨道布局后，他们建议使用带数字信号的伪随机噪声(PRN)调制来进行测距。621B 系统打算提供三维覆盖和连续的全球服务。这种概念和操作技术在霍夫曼空军基地和白沙导弹试验场进行了证实，用的是由伪卫星(亦即陆基卫星)发射卫星信号为飞机定位这种倒过来的测距方法。此外，在新泽西州 Mommouth 要塞的陆军探讨了许多可选的技术，包括测距、测角和用多普勒频移测量。陆军探讨的结果是推荐利用 PRN 调制来测距(亦即伪距测量)，他们认为这是更合适的途径。

1969 年，美国国防部长办公室(OSD)建立了国防导航卫星系统(DNSS)计划，拟将各军种独立的研制工作统一起来，以形成统一的联合使用的系统。OSD 也建立了导航卫星执行控制小组，其职责是确定 DNSS 成功的可能性和对其研究制定规划。由于这些工作，形成了 NAVSTAR GPS 的系统概念。NAVSTAR GPS 计划是由 GPS 联合计划办公室(JPO)制定的。

GPS 系统主要由空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分等三大部分组成，如图 1-1 所示。空间星座部分主要由 24 颗 GPS 卫星组成，主要提供星历和时间信息，向用户发送伪距和载波信号，以及提供其他辅助信息。地面监控部分包括卫星监测站、主控站和信息注入站。监测站是在主控站的直接控制下的数据自动采集中心，对 GPS 卫星进行连续观测；主控站设在美国本土，协调和管理地面监控系统，同时计算各卫星的星历、卫星时钟误差和大气层的修正参数并传送到注入站，同时提供全球定位系统的时间基准和调整偏离轨道的卫星，使卫星正常运转；注入站的主要任务是将星历、钟差、导航电文和其他指令注入到相应卫星的存储系统，并监测注入卫星的准确性。用户设备部分就是用户进行导

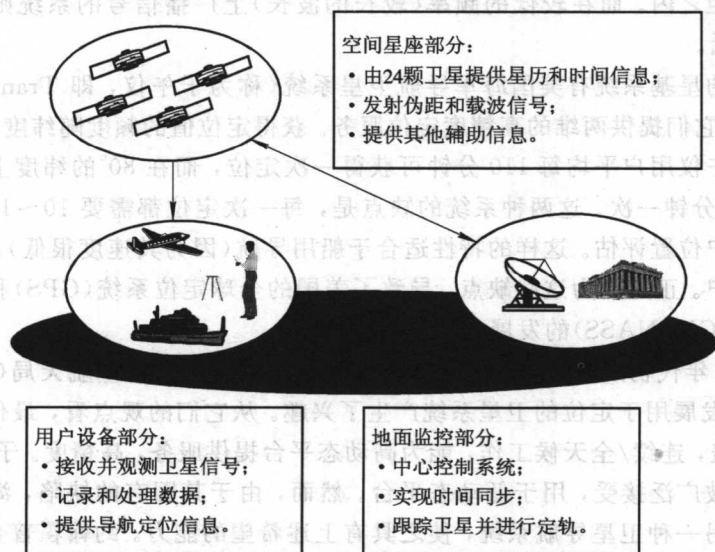


图 1-1 GPS 系统结构图

航定位的终端设备,由接收机硬件(天线、电源、主机等)、数据处理软件以及微处理器构成。

GPS 目前处于良好的运行状态,并满足 20 世纪 60 年代所提出的最佳定位系统标准。这个系统向有适当接收设备的全球范围内的用户提供精确、连续的三维位置和速度信息。GPS 也向全球广播世界协调时(UTC)。组成卫星星座的 24 颗卫星被安排在 6 个轨道平面上,即每个平面上 4 颗。一个分布在全世界的地面控制/监视网监视着卫星的运行状态。这个网络也向无数用户提供服务。卫星以高精度的星载原子频率标准作基准发射导航信号,而星载原子频标是与内在的 GPS 系统时(GPS 系统所采用的时间系统,用高精度原子钟作为时间度量工具。详见第 3 章)基准同步的。卫星用叫做码分多址(CDMA)的技术在两个频率上广播测距码和导航数据。也就是说,系统只使用两个频率,称为 L1(1575.42 MHz)和 L2(1227.6 MHz)。每颗卫星都在这两个频率上发射,但所有的测距码与其他卫星所使用的不一样。这些码选择的依据是它们具有良好的自相关特性,而两两之间互相正交。导航数据提供给接收机,以确定卫星在发射信号时的位置,而测距码使用户接收机能够确定信号的传输延时,从而确定卫星到用户的距离。这种技术要求用户接收机也包含一个时钟。利用这种技术来测量接收机的三维位置时,要求测量接收机到 4 颗卫星的 TOA(信号到达时间)距离,如果接收机时钟已经是与卫星时钟同步的,便需要 3 个距离测量值。因此,为测量用户的纬度、经度、高度和接收机相对于内在系统时的偏移,需要有 4 个测量值。如果系统时或高度已准确获知,便只需要 4 颗以下的卫星。

GPS 系统除定位服务外,同时也能利用 GPS 卫星具有的高稳定性原子时钟为用户提供授时服务,由此用户可以计算出自身的速度。这些服务被称为标准的 PVT(位置、速度、时间的英文缩写)服务。GPS 提供两种精度不同的 PVT 测量:标准定位服务(SPS)和精密定位服务(PPS)。SPS 是为民用服务的,而 PPS 是为美国军方用户和特定的政府部门用户服务的,两者精度不同。

GLONASS 是俄罗斯的星基无线电导航系统,它在全世界范围内提供三维定位、测速以及时间广播服务。GLONASS 在许多方面非常类似于 GPS。这个系统由 24 颗卫星的星座、一个地面监视网和各种类型的用户设备组成。星座包括 3 个轨道平面,每个平面有 8 颗卫星。地面网由位于俄罗斯全境的许多卫星监视和数据上行加载设施组成。俄罗斯及其他国家有几家用户接收设备制造单位,有些制造单位制作组合的 GPS/GLONASS 接收机。

GLONASS 由俄罗斯国防部操作,该计划在 20 世纪 70 年代中期开始执行,目的是为军用。然而情况和 GPS 类似,许多民用用途迅速变得十分明显,这种系统现在已是真正的军民两用系统了。PVT 确定也是用 PRN 测距信号完成的。然而卫星的发射信号与 GPS 不同。GLONASS 使用频分多址(FDMA),其中每颗卫星在不同的频率上发射。这种技术允许各颗卫星使用相同的测距码。

GLONASS 的民用和军用服务是分开提供的。规定的民用服务精度为:在水平面内为 100 m(2drms, 95%);在垂直面内为 150 m(95%)。民用测速精度规定为 0.15 m/s(95%)。由于在编写本书时 GLONASS 还未使用 SA(选择可用性)措施,实际测出的民用精度为水平 26 m(2drms, 95%)、垂直 45 m(95%),速度测量在 0.03~0.05 m/s 的量级。英国利兹大学和 3S 公司通过观测发现,它的军用服务产生的精度与 GPS PPS 相当。

虽然 GPS 和 GLONASS 都可以独立提供导航服务,但上述两种系统可以联合使用,以使导航服务得到提高。另外,用户设备可安排成利用惯性传感器以在存在干扰时提高系统的可靠性,或在都市山谷(亦即高的城市建筑之间)中卫星信号受到遮挡时对车辆导航加以辅助。

有一些应用,比如大地测量、石油勘探和露天矿藏开采,需要比 GPS 或 GLONASS 本身高很多的精度。这些应用采用了可十分明显地改善系统本身的精度的技术,叫做差分 GPS 或差分 GLONASS。精度是由去掉两个或更多个对同样一些卫星进行距离测量的接收机之间相关的(亦即共同的)误差而改善的。一部接收机叫基准接收机,位置是经过测绘的,就是说它的地理位置是精确已知的。去掉共同误差的一种方法是,在离散的时间取出基准接收机的测绘位置和其电子导出位置之间的差值。这种差值代表在测量时的误差,并记为差分校正量。这种校正量可以通过数据链广播到用户接收设备,这样用户接收机可以从其解中去掉这些误差。另一种方法是进行非实时应用,此时可以将差分校正量和用户的位置数据一起存储起来,进行后期数据处理。这种非实时技术典型情况下用在测绘中。

如果基准台在用户的视距之内,这种技术一般称做局域差分。然而,随着用户和基准台之间距离的增加,有些距离误差变得不相关了。克服这种问题的方法是,在一个大的地理区域(亦即一个国家或大陆)内安装一个基准台网,用地球静止卫星广播差分校正量,并核对卫星信号的完好性。中央处理站将校正量和完好性数据送至卫星地球站,以用上行链路送至地球静止卫星。这种技术叫做广域差分。

国际海事卫星(INMARSAT)网络是广域差分服务的一种实现方式。INMARSAT 是一个国际财团,在全球范围内提供移动通信服务,它在 1995 年 1 月由 76 个签字国组成。1996 年,INMARSAT 计划发射 4 颗地球静止卫星,为整个地球 $\pm 70^\circ$ 的纬度之间的区域提供完全的覆盖。然而卫星提供的数据广播服务只能用于拥有地面台网区域的用户。

重叠电文格式包含 GPS 和 GLONASS 差分校正量及完好性数据。除了提供这种数据之外,卫星将发射类似于由 GPS 卫星广播的测距码。因此,各 INMARSAT-3 卫星也可以用作测距源。与 GPS 和 GLONASS 卫星有自己的导航载荷不一样的是,INMARSAT-3 卫星包含的是导航转发器,它们向用户重新广播由上行链路送来的信号。与重叠相关联的精度与许多因素有关,但地面台网的结构是影响其精度的主要因素。美国联邦航空局(FAA)的广域增强系统(WAAS)预计的精度量级为:在水平面内为 $7.6 \text{ m}(2\text{drms}; 95\%)$;在垂直方向为 $7.6 \text{ m}(95\%)$ 。

1.2 GPS 的服务与应用

GPS 提供两种服务:标准定位服务(SPS)和精密定位服务(PPS)。SPS 是指定为民用社团使用的,而 PPS 是指定为美国核准的军方用户和选定的政府部门用户使用的。接入 GPS PPS 是通过加密而受控的。下面对这些服务加以叙述。

1.2.1 精密定位服务

精密定位服务(PPS)规定其所提供的预测精度为:在水平面内,至少为 $22 \text{ m}(2\text{drms}, 95\%)$;在垂直平面内为 $27.7 \text{ m}(95\%)$ 。距离均方根值(或 drms)是在导航中常用的测量值。

drms 的 2 倍或 2drms 是一个圆的半径。从概率上描述, PPS 定位结果落在这个圆中的概率值在 95% 以上。PPS 提供 UTC 的传递精度在 200 ns 以内(95%), 这个 UTC 以在美国海军天文台(USNO)中保持的时间为准, 记为 UTC(USNO)。速度测量精度规定为 0.2 m/s(95%)。

正如前面所说, PPS 主要打算用于军事和选定的政府部门, 也允许民用, 但必须得到美国国防部的特别批准才行。要获得前面所说的 PPS 定位精度是受到控制的, 控制通过叫做反欺(Antispoofing, AS)和选择可用性(Selective Availabilng, SA)的两种加密特性来实现。AS 是一种用以防止欺骗干扰的机制。欺骗干扰是一种技术, 指敌方模仿一颗或多颗卫星的测距码、导航数据信号和载波多普勒效应, 以图欺骗受害的接收机。另外, 根据现行的国防部政策, 实施 SA 是为了让 SPS 用户不能充分得到系统的精度。SA 使卫星时钟发生“颤动”, 因此使 TOA 测量精度变差。同时, SA 还要在所广播的导航数据参数中引入误差。而 PPS 用户可以通过密码机制去掉 SA 的影响。

PPS 在 1995 年春季投入了正常运行。那时, 全部 24 颗卫星已经就位, 而且对地面控制区段及其与星座的相互作用情况完成了广泛的测试。

1.2.2 标准定位服务

标准定位服务(SPS)对全世界的所有用户均是可用的。对 SPS 的使用未设任何限制。这种服务提供的测量精度为: 在水平面内为 100 m(2drms , 95%); 在垂直平面内为 156 m(95%)。UTC(USNO)时间广播精度在 340 ns(95%)以内。这种服务的精度是美国国防部和交通部根据美国的安全利益而共同规定的。一般来说, SA 是 SPS 导出的定位值的主要误差源。

SPS 于 1993 年 12 月开始工作, 那时, 原型卫星和生产卫星加起来已有 24 颗, 而且定位/授时服务已符合规定的相应预测精度。

目前, GPS 和 GLONASS 都已从专门的军用系统演变成了真正的军民两用系统。卫星导航技术正被应用于从休闲徒步到空间运载体引导等各式各样的民用与军事应用中。各门学科(包括各种形式的交通)都受到了影响。用户再也不会因为陆基导航设施的精度和(或)覆盖的局限而被限制在特定的航路内。只要用户处于卫星的视距之内, 便能够获得精确的导航。为了说明卫星导航技术的各种应用, 下面给出现在和计划中的几个应用例子。

1. 航空领域的应用

GPS 在航空领域的应用推动着全球卫星系统(GNSS)的发展, 它可以提供从航路直到精密飞行轨道阶段(起飞、降落)的引导。国际民用航空组织(ICAO)将 GNSS 定义为一种至少包含一个或多个卫星导航系统的系统。GNSS 连续的全球覆盖能力, 使得飞机能够仅依赖 GPS 直接从一地飞到另一地。在 GNSS 接收机中包含一个数据通信装置便能够将飞机位置发射到另外的飞机和空中交通管制(ATC)中心。这种功能叫做自动相关监视(ADS)。根据 ICAO 未来空中航行系统(FANS)工作组的活动结果, ADS 正在用于一些太平洋区域。由此带来的主要益处是 ATC 的防撞监视, 可以使用最佳航路来降低航行时间和油耗。ADS 技术也正在用于同时对飞机和地面维护车辆的机场场地监视。

2. 空间运载引导

从 1992 年起, GPS 接收机便被用于 TOPEX/POSEIDON 卫星上, 这种卫星是用于研

究海洋环境的。这是 NASA(美国航空航天局)和 CNES(法国空间局)的联合项目。GPS 也已用于几种 NASA 航天机飞行。1998 年,航天机预期要将 GPS 用于工作阶段的引导(如地面反射、在轨、再入和着陆)。国际空间站(ISS)将用 GNSS 以支持控制功能、数据收集活动和导航。此外, GPS 将被用于 NASA 的“小”卫星计划, 比如 Lewis 和 Clark。

3. 海洋应用

商业和娱乐海事企业都已在利用 GNSS。从洋面旅行到内河航路, 尤其是艰险的水域, 所有船舶的导航都得到了提高。几个国家正在发展局域差分 GPS 网络, 以在海港、海港入口和内河提高系统精度。俄罗斯也在考虑实现局域差分 GLONASS 网络。广域差分 GPS 已经在离岸石油勘测企业中应用了几年。差分 GNSS 将起到更大作用的一个领域是船舶交通服务(VTS)系统。它将数据链和差分 GNSS 结合起来, 使得能将船只的位置广播到管制中心。VTS 用于在能见度受限和水上结冰时防撞和加快交通流。VTS 可以和电子海图显示信息系统(ECDIS)联用。ECDIS 将船只位置与海图上的目标、导航台陆地以及看不见的危险联系起来显示。

4. 陆用 GPS

测绘行业依靠差分 GPS 已经获得毫米级的测量精度。铁路部门利用类似的技术获得相对于附近的铁轨组的火车位置。GPS 是智能交通系统(ITS)的关键组成部分。在车辆应用方面, GNSS 将用于路径引导、跟踪和应急事故通报中。将 GNSS 与街道数据库数字活动地图显示和处理器集成起来, 能使驾驶员获得引导和距离最短、效率最高的路径。将此系统与蜂窝电话或数据链功能相结合, 能完成车辆跟踪(即一种 ADS 形式)和/或紧急事故通报, 并将车的位置自动报告给管制中心进行车队管理。驾驶员启动“紧急”按钮广播出紧急电文、车辆特性和车辆位置, 以提供给有关部门进行援助。

1.3 Matlab 的基本特性及基本语法

本书在讲述 GPS 系统原理的基础上, 将应用 Matlab 软件仿真其核心算法, 因此本节对 Matlab 系统作一简要介绍。

Matlab 是美国 Math Works 公司推出的一套高性能数值计算软件, 具有优秀的数值计算能力和卓越的数据可视化能力。Matlab 将计算与可视化集成到一个灵活的计算机环境中, 并提供了大量的内置函数以方便用户在工程问题中直接调用来获得数值解。Matlab 的发展不但取得了技术上的不断更新, 也赢得了市场的认可。由于其强大的计算功能, 在国际学术界, Matlab 已经被公认为准确、可靠的科学计算软件, 在许多国际一流刊物, 特别是信息学科的刊物上都可以看到 Matlab 的应用。

Matlab 启动后, 呈现在我们面前的有这样几个基本的窗口: 命令窗口、命令历史窗口、工作空间等, 如图 1-2 所示。窗口的风格和布局, 会因 Windows 环境不同而不同。

如果想显示下面的窗口或者取消显示, 可以打开菜单栏的 Desktop 菜单进行相应的选择。在命令窗口中运行命令, 包括调用函数、变量赋值等等, 都会在历史窗口中保存记录。双击历史窗口中的某一条记录, Matlab 会自动执行该命令。(小技巧: 如果想显示最近一次键入在命令窗口的信息, 可以按下 Ctrl+P 键, 然后按 Enter 键执行。)同时, 工作空间

窗口中会显示出命令运行过程中所产生的变量名、变量值和变量类型。如果想清除工作空间，可以执行 Clear 命令。关于 Clear 命令，将在后面进行讨论。

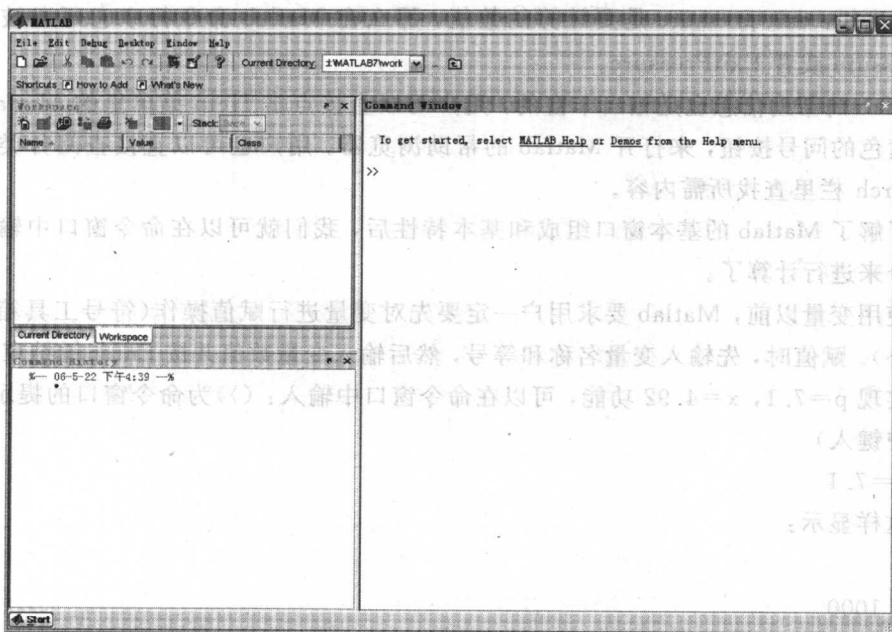


图 1-2 Matlab 的运行窗口

使用 Matlab，可以用来对变量进行算术运算、三角运算、幂运算等。如果没有给出变量名，运算的结果就会赋给通用的变量名 ans。例如，要计算 $\pi/3$ 的正弦值，可以执行命令 `sin(pi/3)`。除了上述基本运算之外，Matlab 还提供了大量的函数来完成复杂的计算，同时 Matlab 也支持用户自定义函数。

如果在命令窗口中反复输入多个表达式，用户会感到很麻烦。为避免这个问题，Matlab 定义了这样一种文件，它包含一组命令，文件中每一个命令的执行都和命令窗口中执行一样，该文件可以由 Matlab 提供的编辑器、操作系统的文本编辑器创建及编辑、保存。这就是 m 文件，后缀名为“.m”。如果要执行 m 文件，则按下 F5 键或者选择 Debug 菜单下的 Run 命令即可。

如果我们想调用某函数或者某 m 文件，可以直接在 Matlab 命令窗口中输入其文件名而不必带 .m 扩展名。但是，Matlab 必须首先知道文件保存的路径。路径信息的输入可以通过 File 菜单下的 Set Path 子菜单实现。单击 Set Path 子菜单，将打开 Path Browser 窗口，可以在该窗口中添加一个或者多个路径。退出 Path Browser 窗口前要点击 Save 命令按钮，该操作将保存添加的路径以备下次使用。

如果不定义变量，那么运算结果就会自动地赋给通用变量 ans。例如，计算 $2 * 5.3$ ，命令窗口会显示结果：

```
ans = 10.6000
```

Matlab 规定，用户创建的变量名不可超过 31 个字符，多余部分将会被忽略掉。变量名要以大写或小写字母开头，后面可以跟大小写字母、下划线或者数字。字符间不允许有空格，且变量名区分大小写。例如，要创建变量 A 并给它赋初值 5.3，可以在命令窗口中

输入“A=5.3”。

为了提高变量名和函数名的可读性，Matlab 中有两个一般的约定：使用下划线和首字母大写。比如，exit pressure 是要计算的数值，那么在 Matlab 命令行中它可以被定义为 exit_pressure 或者 ExitPressure。

Matlab 的帮助信息也是相当丰富的，用户可以直接点击 Help 菜单里的 Matlab Help 项或者黄色的问号按钮，来打开 Matlab 的帮助浏览器。用户也可以直接查阅分类信息或者在 Search 栏里查找所需内容。

当了解了 Matlab 的基本窗口组成和基本特性后，我们就可以在命令窗口中输入一些简单命令来进行计算了。

在使用变量以前，Matlab 要求用户一定要先对变量进行赋值操作（符号工具箱使用的变量除外）。赋值时，先输入变量名称和等号，然后输入变量数值并按 Enter 键结束。例如，如果想实现 $p=7.1$ ， $x=4.92$ 功能，可以在命令窗口中输入：(>>)为命令窗口的提示符，不需要用户键入)

```
>>p=7.1
```

系统会这样显示：

```
p=
  7.1000
```

同样，当输入 $x=4.92$ ，即

```
>>x=4.92
```

系统显示：

```
x=
  4.9200
```

在表达式后面加分号“;”，可以省略系统的响应信息，如：

```
>>p=7.1;
```

```
>>x=4.92;
```

命令窗口除了出现用户输入外，不会有其他反应。

Matlab 也允许命令行一行中输入多个表达式，各个表达式中间以逗号“,”分隔，最后按下 Enter 键结束。例如：

```
>>p=7.1,x=4.92,k=-1.7
```

系统显示为：

```
p=
  7.1000
```

```
x=
  4.9200
```

```
k=
 -1.7000
```

标量的加、减、乘、除和幂运算，我们分别用 +、-、*、/和^表示。例如，在对 p 、 x 、 k 进行上面的变量赋值之后，如果计算下面表达式的值：