

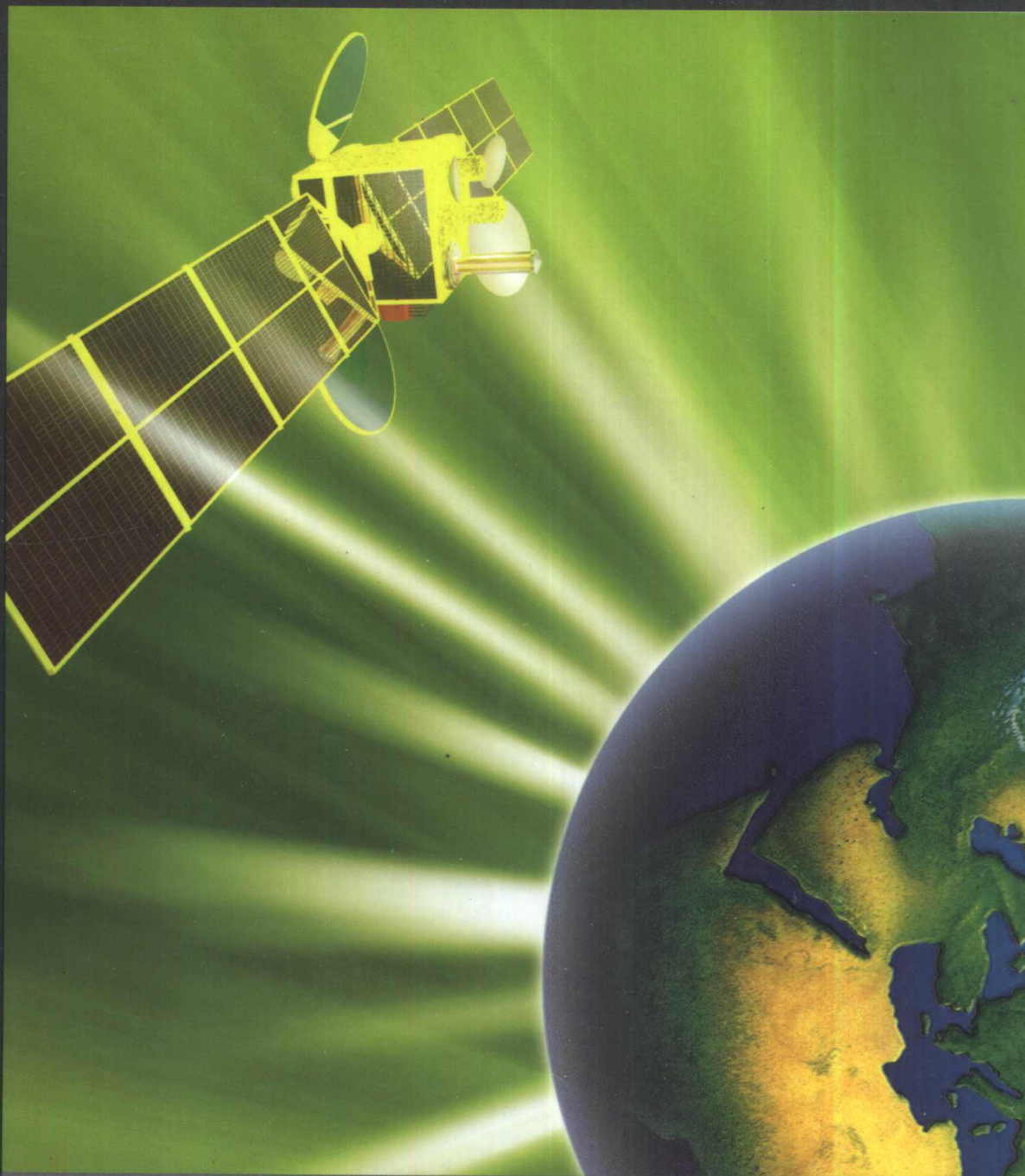
GPS 原理与应用

UNDERSTANDING GPS

Principles and Applications

Elliott D.Kaplan 著

邱致和 王万义 译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

p 22804
1412

GPS 原理与应用

UNDERSTANDING GPS Principles and Applications

Elliott D. Kaplan 著

邱致和 王万义 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书共 12 章,系统地叙述了卫星导航的基本概念,所用的时间与坐标系, GPS 系统的组成,卫星的信号与特性,接收机的截获与跟踪,干扰与抗干扰措施;讨论了 GPS 系统本身的性能,各种差分 GPS 系统,与其他传感器的组合及俄罗斯的 GLONASS 系统。全书概念阐释清楚,给出了许多工程实践知识。

本书可供在海陆空领域从事卫星导航应用的技术人员和从事卫星导航接收机与系统开发的专业人员阅读,也可供大专院校的教师和学生参考。

Original edition Copyright © 1996 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

GPS 原理与应用/(美)卡普兰(Kaplan, E. D.)著;邱致和等译. —北京:电子工业出版社,2002.8

ISBN 7-5053-7898-8

I. G… II. ①卡… ②邱… III. 全球定位系统(GPS)—测量 IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 057835 号

责任编辑:竺南直

印 刷:北京李史山胶印厂

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:22 字数:563 千字

版 次:2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷

印 数:6000 册 定价:39.00 元

版权贸易合同登记号 图字:01-2001-4752

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



序 言

GPS 为导航带来了革命性的变化,它在全球范围内为无限多的海陆空天用户提供精确的实时位置、速度和时间信息。今天从事各行各业的人们都知道,无论白天还是晚上,在城市还是乡村,只要凭借一台小小的 GPS 接收机便能知道自己在哪里。以此为基础, GPS 军民用途正在以前所未有的速度扩展。为此人们急切地需要系统地介绍 GPS 的书籍。

这里翻译出版的是由 Elliott D. Kaplan 主编的 *Understanding GPS, Principles and Applications*。这是一本畅销书,在国外普遍用做高等学校教师和学生、科学工作者与工程师们的参考资料。

全书包含 12 章,采用了“斜坡式”结构。前面三章只有一般性科技知识的人便可以阅读,以了解 GPS 最基本的原理与用法。需要进一步 GPS 知识的读者则要阅读以后的章节,以了解有关 GPS 的卫星信号特性,接收机的截获与跟踪,干扰对 GPS 的影响, GPS 的精度、可用性与完好性,各种差分技术,组合导航技术,俄罗斯的 GLONASS 卫星导航系统, WAAS 系统以及 GPS 应用方面的知识。本书不但内容丰富,而且能适于不同要求的读者阅读。

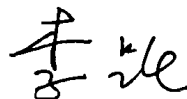
本书的各章撰写人都是从事有关领域工作的专家,有多年从事工程或项目执行的经验。因此,本书除了有比较清晰的原理阐释之外,还给出了许多工程实践知识,这从第 5 章以后的许多叙述中都可以看到。比如本书在叙述 GPS 的精度时,并没有停留在对几何精度因子概念的叙述与推导上,而进一步讨论了它随时间和地点的变化。在此基础上本书研究了 GPS 的可用性,并叙述了 GPS 的覆盖预测软件。在 1999 年的科索沃战争中,人们看到美军在意大利的维琴察空军基地用了类似的软件,以计划 GPS 制导武器攻击目标的时机。又如在第 9 章中作者并未详细重复在许多书中都能找到的卡尔曼滤波器原理,而把重点放在对车辆导航中所发生的实际情况的说明上,指明设计卡尔曼滤波法组合导航系统时必须作许多必要的预先处理。因此本书不但给出了必要的理论基础,而且力图为读者指出通向实际应用的道路。这是这类书籍中并不多见的。

另外,书中有的材料,比如第 5 章中对 GPS 卫星信号的截获与跟踪的叙述,是美国第一次向世界作如此系统而详细的公布。因此,从事 GPS 理论研究和工程实践的读者都可以从本书得到许多益处。许多研究 GPS 的技术论文一直在引证本书的结论,作为立论的基础或出发点。

1998 年友人张继红博士从海外回来,送给了我们这本书。我们用它作为培训从事 GPS 工作不久的技术人员的教材及作为工程实践的参考书,收到了良好的效果。为了推动我国卫星导航技术的发展,我们将本书翻译出版出来,希望更多的读者从中受益。

本书第 1 至 5 章和第 9 章由邱致和同志翻译,第 6 至 8 章和第 10 至 12 章由王万义同志翻译,邱致和同志对全书作了总校对,丁群和陈法祥同志也参加了校对工作。由于译者水平有限,差错在所难免,请读者不吝指正。

信息产业部电子第二十研究所



2001 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 GPS 计划简史	(1)
1.3 GPS 概述	(2)
1.3.1 精密定位服务	(3)
1.3.2 标准定位服务	(3)
1.4 全球导航卫星系统 (GLONASS)	(3)
1.5 各种增强措施	(4)
1.6 应用	(5)
1.6.1 航空	(5)
1.6.2 空间运载体引导	(5)
1.6.3 海事	(6)
1.6.4 陆用	(6)
1.7 本书的组织	(6)
参考文献	(9)
第 2 章 卫星导航原理	(10)
2.1 利用到达时间测量值测距的原理	(10)
2.1.1 二维位置确定	(10)
2.1.2 借助于由卫星产生的测距信号确定位置的原理	(12)
2.2 参考坐标系	(13)
2.2.1 地心惯性坐标系 (ECI)	(14)
2.2.2 地心地球固连 (ECEF) 坐标系	(14)
2.2.3 世界测地系 (WGS-84)	(14)
2.3 关于卫星轨道的基础知识	(17)
2.4 利用伪随机噪声 (PRN) 码确定位置	(24)
2.4.1 确定从卫星到用户的距离	(24)
2.4.2 用户位置的计算	(27)
2.5 求解用户的速度	(30)
2.6 用卡尔曼滤波确定位置和速度	(32)
2.7 时间和 GPS	(34)
2.7.1 UTC 产生	(35)
2.7.2 GPS 系统时	(35)
2.7.3 接收机对 UTC (USNO) 的计算	(35)
参考文献	(36)

第3章 GPS系统的区段	(37)
3.1 GPS系统概述	(37)
3.1.1 GPS卫星星座	(37)
3.1.2 操作控制区段(OCS)	(38)
3.1.3 用户接收设备	(41)
3.2 空间区段各阶段的发展	(45)
3.2.1 对各批卫星特征的小结	(45)
3.2.2 导航载荷	(46)
3.2.3 Block I——初期概念证实卫星	(47)
3.2.4 Block II——初期的生产卫星	(47)
3.2.5 Block II A——升级的生产卫星	(48)
3.2.6 Block II R——补充卫星	(49)
3.2.7 Block II F——后续“坚持”卫星	(49)
3.2.8 对各批卫星的特性和误差预算的小结	(50)
参考文献	(51)
第4章 GPS卫星信号的特性	(52)
4.1 GPS信号的特性	(52)
4.1.1 频率和调制格式	(52)
4.1.2 功率电平	(62)
4.1.3 自相关函数和功率谱密度	(63)
4.1.4 互相关函数和码分多址的性能	(71)
参考文献	(74)
第5章 卫星信号的截获与跟踪	(75)
5.1 GPS信号的截获与跟踪	(75)
5.1.1 GPS接收机的码和载波跟踪	(76)
5.1.2 载波跟踪环	(82)
5.1.3 码跟踪环	(88)
5.1.4 环路滤波器	(93)
5.1.5 测量误差和跟踪门限	(97)
5.1.6 伪距、 Δ 伪距和积分多普勒的形成	(108)
5.1.7 信号截获	(122)
5.1.8 接收机初始工作的顺序	(130)
5.1.9 数字处理的使用	(131)
参考文献	(132)
第6章 射频干扰对GPS卫星信号接收机跟踪的影响	(133)
6.1 射频干扰对跟踪的影响	(133)
6.1.1 干扰类型	(133)
6.1.2 对码相关和环路滤波的影响	(134)
6.1.3 RF干扰影响的分析	(139)
6.1.4 A/D变换的影响	(144)

6.1.5	C / A 码对 CW 干扰的易受性	(149)
	参考文献	(150)
第 7 章	GPS 的性能	(152)
7.1	误差源、测量精度及用户位置和时间的估计	(152)
7.1.1	概述	(152)
7.1.2	伪距误差	(152)
7.1.3	GPS 卫星几何布局和精度因子 (DOP)	(168)
7.1.4	测量精度的讨论和计算	(175)
7.2	GPS 的可用性	(184)
7.2.1	利用全工作能力 GPS 星座时 GPS 可用性的预测	(185)
7.2.2	卫星故障对 GPS 可用性的影响	(186)
7.2.3	现成的覆盖区预测软件	(188)
7.3	GPS 完好性	(195)
7.3.1	临界状态的讨论	(195)
7.3.2	完好性异常原因	(195)
7.3.3	提高完好性的技术	(195)
	参考文献	(204)
第 8 章	差分 GPS	(207)
8.1	引言	(207)
8.2	码基技术	(208)
8.2.1	局域差分 GPS (LADGPS)	(208)
8.2.2	广域差分 GPS (WADGPS)	(222)
8.3	以载波为基础的技术	(229)
8.3.1	精确基线的实时测定	(230)
8.3.2	静态应用	(245)
8.3.3	机载应用	(246)
	参考文献	(248)
第 9 章	GPS 与其他传感器的组合	(250)
9.1	GPS / 惯性导航	(250)
9.1.1	GPS 接收机性能的问题	(250)
9.1.2	惯性传感器性能的问题	(252)
9.1.3	卡尔曼滤波器	(253)
9.1.4	GPSI 组合方法	(256)
9.1.5	可靠性和完好性	(266)
9.2	智能交通系统 (ITS)	(267)
9.2.1	ITS 概述	(267)
9.2.2	车辆传感器和分系统概述	(270)
9.2.3	传感器组合原理	(275)
9.2.4	车辆跟踪系统举例	(278)
	参考文献	(286)

第 10 章 俄罗斯的 GLONASS 系统	(288)
10.1 功能描述	(288)
10.2 计划概述	(288)
10.3 组织结构	(289)
10.4 星座和轨道	(289)
10.5 卫星描述	(291)
10.5.1 星上导航设备	(292)
10.5.2 星上控制设备	(292)
10.5.3 姿态控制系统	(292)
10.5.4 机动系统	(292)
10.5.5 热控制系统	(292)
10.5.6 电源系统	(293)
10.6 地面支持	(293)
10.6.1 系统控制中心	(293)
10.6.2 中央同步器	(293)
10.6.3 指挥和跟踪站	(294)
10.6.4 激光跟踪站	(294)
10.6.5 导航外场控制设备	(294)
10.7 用户设备	(295)
10.8 基准系统	(296)
10.8.1 测地基准	(296)
10.8.2 时间基准	(297)
10.9 GLONASS 信号特性	(297)
10.9.1 GLONASS 频率	(297)
10.9.2 调制	(298)
10.9.3 码特性	(298)
10.9.4 导航电文	(300)
10.10 系统精度	(301)
10.11 GLONASS 未来的发展	(301)
10.11.1 地面段改进	(301)
10.11.2 差分 GLONASS 改进	(302)
10.11.3 空间段的提高	(302)
10.12 GLONASS 信息中心	(304)
参考文献	(305)
第 11 章 INMARSAT 民用导航卫星重叠	(307)
11.1 功能描述	(307)
11.2 INMARSAT 组织	(308)
11.3 计划的历史	(308)
11.4 INMARSAT-3	(310)
11.4.1 卫星描述	(310)

11.4.2	INMARSAT-3 导航转发器	(310)
11.4.3	星座	(312)
11.5	WAAS 信号规范	(312)
11.5.1	WAAS 的信号特性	(313)
11.5.2	WAAS C/A 码	(314)
11.5.3	WAAS 信号的数据内容和格式	(314)
11.5.4	电文类型	(317)
11.6	陆地用户和海上用户的应用	(318)
11.7	关于民用系统演进的建议	(318)
11.7.1	INMARSAT 的建议	(318)
11.7.2	欧洲的工作	(319)
	参考文献	(319)
第 12 章	GPS 的市场和应用	(321)
12.1	GPS: 一种赋能技术	(321)
12.2	GPS 在海上、空中和陆上导航的应用	(322)
12.2.1	海上导航	(322)
12.2.2	空中导航	(325)
12.2.3	陆地导航	(327)
12.3	测绘、地图绘制和地理信息系统中的 GPS	(328)
12.3.1	测绘	(328)
12.3.2	地图绘制	(328)
12.3.3	地理信息系统 (GIS)	(329)
12.4	以 GPS 为基础的产品的娱乐市场	(330)
12.5	GPS 时间传递	(330)
12.6	差分应用和服务	(330)
12.6.1	精密进近飞机着陆系统	(331)
12.6.2	其他差分系统	(331)
12.7	军事和航天应用	(332)
	参考文献	(332)
附录 A	最小二乘方	(333)
缩略词	(336)

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

导航的定义是“使运载体或人员从一个地方到另一地方的科学”。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、想遵循的航向和 / 或到达所希望的目的地所需的待航时间，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（后面称之为用户）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处理这些信号和计算出位置。接收机为用户完成必要的解算（例如计算出距离、方位、估计的到达时间），以导航到所希望的位置。在一些应用中，有可能接收机只处理所接收到的信号，而由分立的处理器完成导航解算。

有各式各样的导航装置，从本节的角度看，可以把它们区分为陆基和星基两类。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，它们提供两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^[1]。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估计。这样的特性适合于船用导航，因为它速度很低。但不适合于飞机和高动态用户^[2]。正是因为这些缺点，导致发展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）。

1.2 GPS 计划简史

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发生了兴趣。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（已于上节叙及），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变形建议。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。然后对 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^[3~5]。

在考虑提高子午仪和进行 Timation 工作的同时，空军也在进行记为 621 B 系统的卫星定位系统的概念研究。它设想 621 B 系统的卫星将在倾斜角为 0° 、 30° 和 60° 的椭圆轨道上。研究了各种卫星数量（15~20 颗）和它们的轨道布局。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、测角和用多普勒测量。陆军探讨的结果，推荐利用 PRN 调制来测距（亦即伪距测量），认为这是所希望的途径^[5]。

1969 年，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调控小组，它的职责是确定 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）制订的。在写作本书时，GPS JPO 还在继续管理新卫星、地面控制设备和军用用户接收机的研制和生产。NAVSTAR GPS 系统简称为 GPS。

1.3 GPS 概述

现在，GPS 已经是全运行的，而且满足 20 世纪 60 年代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用户提供精确、连续的三维位置和速度信息。GPS 也广播一种形式的世界协调时（UTC）。卫星星座由安排在 6 个轨道平面上的 24 颗卫星组成，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健康与状态。这个网络也向卫星上行加载导航数据和其他数据。由于用户接收机无源工作（亦即只做接收），GPS 可向无限数目的用户提供服务。系统利用单向到达时间（TOA）测距的概念。卫星以高精度的星载原子频率标准做基准进行发射，而星载原子频标是与内在的 GPS 系统时基准同步的。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，称做 L_1 （1 575.42 MHz）和 L_2 （1 227.6 MHz）。每颗卫星都在这两个频率上发射，但所使用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两两之间有较好的互相关特性（卫星信号特性将在第 4 章中讨论）。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，要求测量到 4 颗卫星 TOA 距离。如果接收机时钟已经是与卫星时钟同步的，便只需要 3 个距离测量值。然而导航接收机中一般使用石英钟，以使接收机的价格、复杂性和尺寸减至最小。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。如果系统时或者高度已准确知道，便只需要 4 颗以下的卫星。第 2 章将对 TOA 测距以及用户的位置、速度与时间

(PVT) 确定作详细叙述。

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。

1.3.1 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 22 m (2drms, 95%)；在垂直平面内，27.7 m (95%)。距离均方根值 (或 drms) 是在导航中常用的测度。drms 的二倍或 2drms 是一个圆的半径，这个圆中至少包含了在任何一个地方用一个系统 (这里是 PPS) 获得的所有可能的定位值的 95%。PPS 提供的 UTC 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)^[1]。速度测量精度规定为 0.2 m/s (95%)^[4]。

正如前面所说，PPS 主要打算用于军事和选定的政府部门用户，也允许民用，但只能是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 Availability, 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，此时敌方复现一颗或几颗卫星的测距码、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^[6]。PPS 用户通过密码机制去掉 SA 的影响^[4]。

PPS 在 1995 年春季达到了全工作能力。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。

1.3.2 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。这种服务提供的预测精度为：在水平面内，100 m (2 drms, 95%)；在垂直平面内，156 m (95%)。UTC (USNO) 时间广播精度在 340 ns (95%) 以内^[1]。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。SA 一般说来是 SPS 导出的定位值的主要误差源，本书第 8 章将叙述减轻其影响的技术。

SPS 的初始工作能力 (IOC) 是 1993 年 12 月达到的，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。

1.4 全球导航卫星系统 (GLONASS)

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。俄罗斯和世界上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，和 GPS 类似。GLONASS 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双用了。PVT 确定是用 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是：在水平面内，100m（2drms，95%）；在垂直面内，150m（95%）。民用测速精度规定为 0.15m/s（95%）^[7]。在写本书时 GLONASS 还未使用 SA 措施，实际测出的民用精度为水平 26m（2drms，95%），垂直 45m（95%）。速度测量在 0.03~0.05 m/s 的量级^[7, 8]。由利兹大学和 3S 公司的观测指出，它的军用服务产生的精度与 GPS PPS 相当。虽然在写作本书时军用服务尚未加密，但俄罗斯申明它只为军用^[7, 9]。时间广播能力在（苏联）UTC 的 5ms 以内。

1.5 各种增强措施

可通过增强来提高单独 GPS 或 GLONASS 的性能。事实上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牢固性，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（见第 9 章更详细的叙述）。

有一些应用，比如精密农业、石油勘探和露天矿藏开采，需要比 GPS 或 GLONASS 本身高得多的精度。这些应用采用了会十分明显地改善系统本身的精度性能的技术，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的位置之间的差值。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种误差。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，在数据收集时期之后使用。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，有些测距误差变得不相关了。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，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。各基准站将它们收集到的数据送至一个或几个中央处理站，在那里形成差分校正量，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。（码基技术和载波差分技术将在第 8 章叙述）。

国际海事卫星（INMARSAT）重叠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。在 1996 年 INMARSAT 计划发射 4 颗地球静止卫星，为整个地球±70° 的纬度之间的区域

提供完全的覆盖。然而必须指出，卫星的数据广播只能用于这样的用户，即其所在的区域有相应的地面站网。这种地面台网将由服务提供者（例如民用航空局（CAA））操作；而 INMARSAT 负责空间区段。上行链地球站则由分别的 INMARSAT 签字成员组织（例如美国的 COMSAT）操作。

重叠电文格式包含有 GPS 和 GLONASS 差分校正量和完好性数据。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 卫星也可以用做测距源。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。虽然与重叠相关联的精度是许多因素的函数，其中包括地面台网的结构。美国联邦航空局（FAA）的广域增强系统（WAAS）预计的精度量级为：水平面内 7.6 m（2 drms，95 %），在垂直方向 7.6 m（95 %）。（WAAS 将在第 7 章和第 11 章叙述）。

1.6 应 用

如上所述，GLONASS 和 GPS 都已从专门的军用系统演变成了真正的双用系统。卫星导航技术正被应用于从休闲徒步到空间运载体引导的各式各样民用与军事应用中。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式应用，下面给出现在和计划中的几个应用例子。第 12 章将对应用和市场计划作进一步讨论。

1.6.1 航空

航空社团推动着使用全球导航卫星系统（GNSS）和各种增强系统，以提供从航路直到精密进近飞行阶段的引导。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，使得飞机能够在考虑到障碍物净空和需要遵循的程序等因素的条件下直接从一地飞到另一地。在 GNSS 接收机中包含一个数据链便能够将飞机位置发射到另外的飞机和 / 或空中交通管制（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支持车辆的机场场面监视。

1.6.2 空间运载体引导

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^[10]。这是 NASA 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。在 1998 年，航天机预期要将 GPS 用于所有工作阶段的引导（如地面发射、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 计划用于 NASA 的“小”卫星计划，比如 Lewis 和 Clark^[11]。

1.6.3 海事

商业和娱乐海事社团都已在利用 GNSS。所有水上载体的导航都得到了提高，从洋面旅行到内河航路，尤其是难险的水域。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。独联体也在考虑实现局域差分 GLONASS 网络^[7]。广域差分 GPS 已经为离岸石油勘探社团用了几年了。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。

1.6.4 陆用

测绘社团依靠差分 GPS 已经获得毫米级的测量精度。铁路社团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，将能使驾驶员获得引导和（或）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将能完成车辆跟踪（即一种 ADS 形式）和 / 或紧急事故通报。可以将车的位置自动报告给管制中心作车队管理。驾驶员启动“紧急”按钮便广播出紧急电文、车辆特性和车辆位置，以提供给法律强制执行当局进行援助。（ITS 车辆应用将在第 9 章叙述）。

1.7 本书的组织

本书首先让读者了解用 GPS 测量 PVT 的基本知识。在建立这一基础后，再描述 GPS 系统的方案。接着集中讨论卫星的信号特性和它们的产生。然后研究对接收到的信号的捕获与跟踪，以及距离和速度的测量过程。也分析了在存在干扰的条件下信号的捕获与跟踪。然后评价 GPS 的性能（精度、可用性和完好性）。接着讨论 GPS 差分技术。给出了包括 ITS 车辆应用在内的传感器辅助技术。在完成了上述题目之后是 GLONASS 和 INMARSAT 重叠的综合叙述。最后，给出了 GPS 应用和相应的市场预测信息。下面叙述每章的扼要内容。

第 2 章给出用户确定 PVT 的原理。从叙述 TOA 测距的概念作为开拓，然后给出由 GPS 获得三维用户位置、速度以及 UTC（USNO）的原理。这一章中还包括关于 GPS 参考坐标系、地球模型和卫星轨道的一些初步知识。

第 3 章给出了 GPS 系统的方案。这里包括对空间区段，操作控制区段（亦即遍布全世界的地面控制 / 监视网）和用户（设备）区段的叙述。描述了星座的详情，给出了卫星类型和相应的特性。人们将会发现，随着卫星技术的成熟，卫星的功能在增加。在操作控制区段（OCS）和诸卫星之间的相互作用是令人感兴趣的。多数用户不知道，为向用户提供最佳的服务，由遍布世界的 OCS 网完成“日夜连轴转”的卫星跟踪。对用户接收设备及有关选择判据作了概述。这些判据即与民用也与军用有关。

第 4 章描述了 GPS 卫星信号及它们的产生。在这一章里我们研究 GPS 卫星信号的特

性，包括频率分配、调制格式和 PRN 码的产生。还同时叙述接收信号的功率电平，以及相应的自相关和互相关特性。

第 5 章叙述接收机对信号的捕获与跟踪，内容的一部分对于 GPS 用户社团来说是全新的。这是首次在一篇文献中如此详细地描述 GPS 信号的捕获与跟踪。给出了在设计或分析 GPS 接收机时必须涉及的各种课题的详细情况。研究了信号截获与跟踪策略，包括那些在高动态应力环境中需要的策略。描述了获得伪距、 Δ 距离和积分多普勒测量值的过程。这些参数是在作距离和速度测量时的关键观测量。

第 6 章中分析了故意干扰（亦即 Jamming）和无意干扰（例如电视信号的谐波）对接收机信号捕获和跟踪的影响。对包括自适应天线、载波环辅助和前端滤波等在内的干扰减轻技术也作了讨论。也研究了射频干扰对接收机模数（A/D）变换过程的影响。这里证明了相关之前的 A/D 变换器易于为连续波干扰机“俘获”，使接收机在比预计的干扰电平更低时失效。为减轻这种影响，建议使用非线性 A/D 变换。

第 7 章从精度、可用性和完好性方面研究了 GPS 的性能。这里说明距离测量误差和用户/卫星的相对几何分布是如何造成计算出的用户位置误差的。这些距离测量误差由下列因素引起：比如由电离层和对流层造成的卫星信号传播延时、相对论效应、SA 和接收机噪声。对这些和其他距离测量误差作了详细叙述。还混合给出了普通 GPS 理论和其他一些有兴趣的扩展。对传统的几何精度因子（DOP）参数作了定义。几何精度因子参数是用户/卫星几何分布因素，它把用户的位置和时间误差参数与距离测量误差参数联系起来。这里说明了，DOP 参数和距离测量误差如何可以合并起来，以估计出用户的垂直和水平位置估计值的分布特性。既讨论了标准理论，也讨论了包括 DOP 概率处置在内的有趣的扩展。在标准处置中，用户/卫星的几何关系被认为是固定不变的。这对在一个短的时间段的一个固定位置来说，对精度特性作估计是合适的。在概率处置中，认为用户的位置和（或）观测时间是在一定范围内变化的。由此必然要回答的问题是，当位置在一定范围和在一定范围时，确定从中随机取出的用户位置估计精度。给出了将 DOP 分布和 UERE 分布合并起来，以确定可能获得的位置精度分布的方法。这种分析类型使大家能了解 GPS 服务在一个地理区域和在一个规定的时间段内所提供的综合精度。

作为导航服务来说对 GPS 的性能作了进一步研究，即讨论 GPS 的可用性。服务的可用性转换为对于特定的应用来说有适当的卫星几何分布。利用计算机模拟的结果，给出了全星座和星座中最多有三颗卫星发生故障时的 GPS 全球服务可用性。还研究了完好性。在本书中，完好性是系统不应当用作导航时发出报警的能力。由于每颗卫星大致覆盖着三分之一的地球，完好性是一个重要参数。系统完好性可以利用接收机的卫星一致性校验算法或者利用像 INMARSAT 重叠这样的外部源来提高。一致性校验算法叫做接收机自主完好性监视（RAIM）。

第 8 章讨论了差分 GPS（以下称作 DGPS）对精度的提高。这些技术利用了卫星广播伪随机码和/或载波频率测量。首先叙述了局域 DGPS 并与 GPS 本身作了精度比较。然后叙述了误差去除技术。正如前面说到过的，实时 DGPS 技术需要有在基准接收机与用户接收机之间的数据链。一般情况下使用标准的电文格式。电文格式由海事服务无线电技术委员会（RTCM）规定，而且得到了广泛使用。本章对 RTCM 的电文类型作了详细介绍。然后研究了公共的（亦即相关的）卫星观察误差。随着用户与基准台之间距离

的增加，有一些误差变得不相关了。因此应用差分校正不能完全去除这些误差。用多个基准站以形成广域 DGPS (WADGPS) 网便能避免这个问题。这里对 WADGPS 作了广泛的叙述。

第 8 章也叙述了使用干涉仪技术的 DGPS。这种技术偶尔也叫“载波-相位跟踪”。用处理接收卫星信号多普勒频率的办法可以常规地获得极高的精度 (动态应用时为 20 cm, 在静态应用是毫米级)。将这种频率信息积分起来形成相位测量, 再对其进行处理以获得上述精度。与这种技术相关联的一个关键问题是整周模糊度解算。本章给出了解决这个问题的技术。

在一些应用中 GPS 的牢固性不足以提供连续的用户 PVT。在“都市山谷”中卫星信号被高楼遮挡或当遇到故意 / 无意干扰时, 接收机的工作很可能会变差。因此, 需要其他传感器以增强用户接收机。第 9 章讨论了这个领域。首先叙述 GPS 和惯性传感器技术的组合。这一般由卡尔曼滤波器来完成。这里叙述了卡尔曼滤波, 接着叙述了各种 GPS / 惯性导航系统 (INS) 组合方案。作为例子描述了 GPS 和 INS 测量值紧耦合结构的处理。

第 9 章中也包括 ITS 车辆应用。讨论了将 GPS 接收机、数字地图显示器、街道数据库和驾驶员界面单元集成起来, 以提供道路引导。在其中接入数据链便能进行车辆跟踪和 / 或紧急情况通报。正如前面所说, 从车辆天线到卫星的视距有可能被比如高楼或隧道等障碍物遮挡住。为了在发出这种中断时保持精确引导, 要使用外部传感器。这些传感器可以是传动机构或轮子传感器以测量轮子转动的圈数, 或者低价格加速度计和 / 或陀螺以提供位置和速度信息。还叙述了设备集成和制作系统模型。本章结束时给出了车辆跟踪系统集成的例子, 包括在布诺利艾利斯、旧金山和东京测试的结果。

在第 10 章叙述了俄国的 GLONASS。首先对这个计划作了概述, 其中有许多历史事实。然后讨论了星座及与之相关联的轨道平面特性。接着描述现行的卫星设计和地面控制 / 监视网络。然后讨论了用户设备。现在的趋向是生产同时利用 GPS 和 GLONASS 系统的接收机。也给出了 GLONASS 的坐标系, 地球模型和时间基准。它们和 GPS 所使用的不一样。还包括以精度和可用性表示的系统性能。提供了改善所有系统区段的 GLONASS 发展计划。差分服务也正在计划中。

第 11 章讨论了 INMARSAT 重叠和其同时对 GPS 和 GLONASS 在精度、可用性、和完好性方面的提高。这种重叠将因提供从航路直到着陆的引导而使航空界受益。此外, 重叠使得能够降低飞机之间的间距, 由此将转化为增加交通流量。陆上, 海上和空间用户也将由此服务受益。对 INMARSAT-3 卫星以及计划的星座作了陈述。对联邦航空局 (FAA) 的 WAAS 所用的 INMARSAT 电文结构作了详细叙述。本章最后讨论了建议的民用卫星星座的发展。

第 12 章专门叙述 GPS 市场和应用方面的问题。GPS 已在各种类型的交通运输中得到了广泛的应用。在海事应用方面, 全世界大约有 5000 万艘船只, 仅北美便有 1800 万艘。这代表 GPS 一个大的潜在市场。此外, 美国计划在 2000 年左右撤消陆基航空导航设施^[1], 将迫使航空社团几乎完全依赖于 GPS 和惯性引导这样的经批准的增强系统。有人已经预测, 在 1994 年至 2004 年的 10 年时期内, 世界空中交通管理市场可以达到 2 000 亿美元。由于陆地车辆市场庞大, 看来是最有前途的。全世界的小汽车数量超过 4.2 亿辆, 卡车超过 1.3 亿辆, 北美占了 1.5 亿和 0.4 亿辆以上。将第 9 章所述的技术集成在一部分车辆中是