

AH



国防电子信息技术丛书

Understanding GPS: Principles and Applications
Second Edition

GPS 原理与应用 (第二版)

Elliott D. Kaplan 主编
ristopher J. Hegarty

寇艳红 译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书系统、深入地阐述了 GPS 的各项相关内容, 包括其发展背景、基本原理、系统构成、信号特性、接收机信号处理、信道恶化及抗干扰、性能评估、差分技术、与其他传感器的组合和网络辅助、GALILEO 及其他卫星导航系统, 以及 GNSS 市场和应用。本书的内容丰富, 实用性强, 理论分析清楚, 工程示例翔实, 充分反映了近年来的新技术和新成果, 是卫星导航领域的一本优秀参考书。

本书可以作为卫星导航定位及相关领域的系统设计师、算法设计师、软硬件工程师和科技工作者的业务工具书, 也可作为高校相关专业教师和研究生教学的教材和参考书。

© 2006 ARTECH HOUSE, INC.
685 Canton Street, Norwood, MA 02062.

本书中文翻译版专有出版权由 Artech House Inc. 授予电子工业出版社, 未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2005-5655

图书在版编目 (CIP) 数据

GPS 原理与应用: 第 2 版/ (美) 卡普兰 (Kaplan,E.D.), (美) 赫加蒂 (Hegarty,C.) 主编; 寇艳红译.

北京: 电子工业出版社, 2012.8

(国防电子信息技术丛书)

书名原文: Understanding GPS: Principles and Applications

ISBN 978-7-121-17602-9

I. ①G… II. ①卡… ②赫… ③寇… III. ①全球定位系统 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 158764 号

策划编辑: 谭海平

责任编辑: 谭海平

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 33 字数: 845 千字

印 次: 2012 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 69.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

译者序

GPS 可以在全球范围内为数量不限的海陆空天用户提供全天候的、连续精确的位置、速度和时间信息,其建成和成功应用是现代科学技术发展的结晶,是导航技术现代化的重要标志,为美国带来了巨大的军事和经济利益,也引起了世界各国的普遍关注。一些国家相继投资建设自己的卫星导航系统或增强系统,如俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 GALILEO 系统和中国的北斗系统等。伴随着已建成系统的现代化和新系统建设的热潮,以 GPS 为代表的卫星导航技术、产品、应用和服务也正处于飞速发展之中。基于如此种种,《GPS 原理与应用》(第二版)中文版的适时出版是非常重要的。

本书译自 2006 年由 Elliott D. Kaplan 和 Christopher J. Hegarty 主编的 *Understanding GPS: Principles and Applications* 第二版。第二版的推出是在第一版获得畅销并广为引证的基础上,根据卫星导航系统的升级换代和新技术的不断涌现,对原有内容进行了较大程度的更新,增加了若干新论题,同时列举了大量最新的公式、示例及图表,从而及时为广大卫星导航研究人员和从业人员提供了丰富的信息、广泛的参考空间和有用的实践指导。

全书共十二章,从对技术背景、卫星导航原理、系统构成和 GPS 信号特性的介绍入手,分析了 GPS 接收机中信号捕获、跟踪、数据解调和观测量获取的过程,阐述了干扰对信号接收的影响及其减轻措施,讨论了单点 GPS 的精度、可用性、完好性和连续性。还论及差分技术,其他传感器及网络辅助技术,GALILEO, GLONASS,北斗和 QZSS 系统以及 GNSS 市场和应用。这种斜坡式结构可适用于不同要求的读者阅读。

本书的撰写人都是从事相关领域工作的专家,具有多年科学研究和工程实践经验,在卫星导航技术领域积累了丰厚的知识、经验和素材。书中将透彻的理论阐释和工程实际问题紧密结合,同时融入了许多新内容,例如 GPS 系统和信号的现代化,高度坐标与大地水准面,星座设计, M 码跟踪误差,军码直捕,信噪比测量和锁定检测, RF 干扰和多径的影响及减轻,电离层闪烁,硬件偏差, GPS 连续性,基于载波相位差分的定姿, DGPS 电文格式, GPSI 组合中的载波环辅助、码环辅助和超紧组合, GALILEO 和其他卫星导航系统,以及 GNSS 的新市场和新应用等。本书综合性较强,对问题的论述精辟深入,应用举例题材新颖,并给出了许多参考文献,在 GPS 界较有影响,曾被许多学术论文引用。对于卫星导航及相关领域的系统设计师、工程师、高校教师和高年级本科生、研究生而言,堪称是一本不可多得优秀参考书。

本书由北京航空航天大学电子信息工程学院副教授寇艳红博士完成翻译工作。由邱致和王万义同志翻译的本书第一版为第二版的翻译提供了大量有用的参考。北京航空航天大学 2004 ~ 2006 级研究生李丹、朱正鹏、边亮、王宾、张硕、梁云华、张惊等协助进行了大量输入和排版工作,张铮文博士、赵昀博士、张波博士和李锐博士也为译稿提出了不少中肯的意见。译者对此表示诚挚的感谢。翻译中译者力求忠实于原著,但限于时间及水平,不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。

前 言

自从写作本书第一版以来,全球定位系统(GPS)的应用已几乎是无处不在。GPS 提供的位置、速度和时间信息使我们日常生活中的许多应用得以进行。GPS 正处在发展演进当中,将为军民用户提供更高的精度和稳健性。增强系统的繁荣和其他系统——包括 GALILEO 系统的发展已经显著改变了卫星导航的前景。这些重要的事件也推进了本书第二版的编写。

同第一版一样,第二版的目标是为读者提供一个完整的 GPS 系统工程论述。本书的作者是由多学科专家组成的一个团队,在本书所讨论的领域中具有实践经验。他们为每一个论题都提供了全面论述。在新版的工作中我们试图修改第一版内容使之跟得上新发展,这是通过对一些已有内容的修订和新内容的大量增加来实现的。

新增内容包括卫星星座设计准则,对新卫星(Block IIR, Block IIR-M, Block IIF)的描述,对控制区段和升级计划的全面叙述,对卫星信号调制特性的介绍,对现代化 GPS 卫星信号(L2C, L5 和 M 码)的描述,以及对 GPS 信号处理技术进展的综述。第一版中关于干扰对传统 GPS 信号影响的论述被大大扩展,同时新增加了关于干扰对现代 GPS 信号影响的论述。此外,还新添了对多径和电离层闪烁以及对 GPS 信号的相关影响的深入讨论。

GPS 的精度在过去 10 年间得到了显著改进。本书给出了 GPS 精密定位和标准定位服务的最新误差预算,也包括测得的性能数据、对服务连续性的讨论以及可用性和完好性的最新诠释。

第一版中对差分 GPS 的论述也得以大大扩展。全面阐述了 GPS 误差随着地理位置和时间的变化。本版中的新增内容还有对使用载波相位技术进行定姿的讨论、对星基增强系统(如 WAAS, MSAS 和 EGNOS)的详细描述,以及对许多其他运行中或计划中的基于码和载波的差分系统的描述。

将 GPS 集成到还依赖于其他传感器的导航系统中仍然需要广泛的实践。第一版中关于将 GPS 同惯性和汽车传感器组合的内容得到了相当多的扩展。第二版中新增的内容是关于将 GPS 接收机嵌入手机中的全面论述,其中包括对网络辅助方法的详述。

除了 GPS,本书还尽可能详细地给出了欧盟 GALILEO 计划在发展现阶段的有关情况。同时,也涉及俄罗斯的 GLONASS、中国的北斗和日本的准天顶卫星系统。

同第一版一样,本书的结构组织如下:一个具有一般性科技背景知识的读者可以通过前面几章的学习了解 GPS 的基本原理与用法;而具有较强的工程/科学背景的读者将能够深入钻研更深的技术内容并从中受益。正是数学或技术复杂性的这种“斜坡式上升”,以及对关键论题的论述,才使得本书能够作为学生的教科书和参考资料。本书的第一版在全世界范围销售了 1 万多册。我们希望第二版将建立在第一版成功的基础上,并对从事涉及 GPS 和其他卫星导航系统应用的数量快速增长的工程师和科学家有所裨益。

尽管本书一般是为工程/科学团体编写的,却用了一整章着墨于全球导航卫星系统(GNSS)的市场和应用。这一点区别于仅仅关注 GPS 市场和应用的第一版。这里给出的意见来自编写本书的作者们,而不必反映 MITRE 公司的观点。

作者简介

John W. Betz 是 MITRE 公司的一员。他在罗彻斯特大学获得了电气工程学士学位,在美国东北大学获得了电气与计算机工程硕士和博士学位。在 MITRE 公司以及此前任职的分析科学公司和 RCA 公司,他一直从事声纳、雷达、通信、导航及其他应用的信号处理分析与研发工作。Betz 博士领导了一个 M 码信号设计的调制与捕获设计团队,并在 M 码信号设计与评估研究的多个领域做出了贡献,包括 BOC 调制的开发。他在现代化 GNSS 的其他许多方面也做出了贡献,包括参加了有关 GPS 和 GALILEO 以及 GPS 和 QZSS 技术和专家工作组。Betz 博士也是美国空军科学咨询委员会的成员,并获得了 2001 度导航学会的 Burka 奖。

J. Blake Bullock 是摩托罗拉移动设备部定位解决方案的产品经理。他在摩托罗拉公司工作了 10 年,主要从事 GPS 接收机及应用、远程信息系统和分布式导航解决方案等工作。Bullock 先生获得了加拿大卡尔加里大学的地球信息工程学士和硕士学位。他在 GPS、导航、交通和数字地图领域拥有 9 项专利,发表了多篇论文、大量文章和一篇学位论文。Bullock 先生是导航学会会员,现正在亚利桑那州立大学攻读 MBA。

Richard Clark 在伊利诺伊大学获得了物理学学士学位,在北伊利诺伊大学获得物理学硕士学位。1977 年,他在美国及欧洲教授中学物理和数学,之后加入了空军,从事电子和航天器方面的技术评估工作。

Rob Conley 是 Overlook Systems Technologies 有限公司的总工程师。他在 GPS 计划的多个领域已有 24 年的工作经验。他的 GPS 生涯始于 GPS JPO,在那里他是用户设备飞行测试工程师,并主管 GPS 运营控制系统与 Block II 卫星接口的研发工作。Conley 先生花了 4 年时间在施里弗空军基地监督 GPS 指挥与控制软件的开发与集成,并指导了第一颗可供使用的 GPS 卫星的测试计划。他在 Overlook 公司工作了 15 年以上,一直致力于军用和民用 GPS 服务水平的提高。Conley 作为 GPS 支持中心的第一名项目主管,为国防部长助理办公室制定了 C3I 计划最初的 GPS SPS 信号规范。他目前是 GPS 运营中心的项目主管。Conley 毕业于美国空军学院,获得了航天工程学方面的学位。

Ronald J. Cosentino 在布鲁克林工学院获得了电气工程学士学位,在 Fordham 大学获得了数学硕士学位。他在通用电器公司和康奈尔航空实验室开发雷达系统。在辛辛那提电子公司,他主要研究雷达和通信系统。而在 MITRE 公司,Cosentino 在多个技术领域做出了贡献:包括雷达与通信系统、信号处理算法、VLSI 结构、空中交通管制系统以及精密着陆系统。后来又涉足导航和仪表着陆中使用的 GPS 和微波着陆系统等领域。

David W. Diggle 是位于俄亥俄州雅典市的俄亥俄大学航空电子工程中心的副主任。1999 年,在获得俄亥俄大学电气与计算机工程博士学位之后不久,他作为一名研究员加入了该中心。他研究的领域包括用于大地测量及飞机精密进近着陆应用的 GPS 实时精密定位。基于他在博士论文期间完成的研究,他被 RTCA 授予 Jackson 奖。该奖项每年授予在航空电子领域做出杰出贡献的人士。Diggle 博士是 IEEE、导航学会、国际罗兰协会、Sigma Xi、Eta Kappa Nu 和 Tau Beta Pi 工程协会的会员。此外,他还拥有俄亥俄大学飞行学院颁发的私人飞行执照。

Arthur J. Dorsey 是洛克希德·马丁信息系统与服务公司的高级工程师。他在 GPS 和空中交通控制自动化系统的研究、设计和开发方面有超过 20 年的专业经验,并且是 GPS 导航精度、空中交通控制雷达数据处理及冲突检测领域的专家。他参与了 GPS CS 导航处理最初的算法设计、开发和现场应用,以及最近的 L-A II 的开发和现场应用。他参加了 GPS 控制段重构分布式工作站实现(AEP)的开发,完成了 GPS 监测站接收机的分析和特性描述,并参加了洛克希德·马丁公司的广域 GPS 差分系统的研发。他设计并开发了洛克希德·马丁公司广域 GPS 差分服务流量建模工具和 DOD GPS 服务水平规划工具,该工具用于评估导航性能。最近,Dorsey 博士完成了现代化信号中新的改进时钟和星历电文定义的基础分析工作。他曾经设计了空中交通控制跟踪和机动检测算法。他拥有马里兰大学电气工程学士、硕士和博士学位。

Philippe Erhard 拥有法国国家民航学院(Ingénieur-Ecole Nationale de l'Aviation Civil)航空与无线电导航科学与工程硕士学位。他在 Alcatel Space 公司(图卢兹,法国)和 Astrium Space 公司(stevenage,英国)工作了 6 年,从事通信和导航空间系统领域的工作。2001 年他加入了 ESA,成为 ESA/ESTEC 的 GALILEO 计划办公室的 GALILEO 导航系统工程师和信号专家。他负责协调 GALILEO 的信号设计、运行和验证活动。他还是主管相关验证试验床硬件[GALILEO 信号验证工具(GSVF)]设计和采购项目的经理,包括 GALILEO 星座仿真器、射频信号发生器和试验板级导航接收机。Erhard 的职责之一是作为 GALILEO 信号专题工作组的技术协调人为欧委会提供支持。这一专题工作组是由欧委会领导的,特别是在欧盟/美国有关 GALILEO 与 GPS 谈判与合作的框架下。他曾经担任法国巴黎 ESA 指挥部部长政策办公室的主任。

Marco Falcone 是 ESA GALILEO 计划办公室的系统工程经理。他的主要任务是定义 GALILEO 的系统级需求和接口,并保证 GALILEO 系统满足所需的导航和完好性性能。Falcone 从 1991 年起就在 ESA 工作。首先,作为 Hermes 空间飞船地面支持电气设备工程师参加 ESA/CNES Hermes 联合小组,随后,在 ESA 研究技术中心作为 ENVISAT 地面段小组的有效载荷数据工程师。在此之前,Falcone 受雇于 Intecs Sistemi 公司软件工程/空间项目小组,参加 COLUMBUS 和 Hermes 项目。他在故乡意大利获得了 Pisa 大学计算机科学的硕士学位,又获得了荷兰 Delft 大学的空间系统工程硕士学位。

Scott Fairheller 在国际卫星导航系统和国际空间政策方面已有超过 22 年的工作经验。1989~1997 年,他作为国防部技术代表参与了 1988 年美国-苏联运输协议及 1994 年美国-俄罗斯运输协议中 GPS-GLONASS 部分的制定。从 1999 年起,Fairheller 就为美国-欧盟 GPS-GALILEO 的谈判提供支持。目前,他作为航天工程师为美国空军工作。他于 1982 年在 Dayton 大学获得学士学位,于 1997 年在联合军事学院获得硕士学位。1987 年,Fairheller 先生成为美国导航学会会员。

Michael Foss 拥有美国东北大学电气工程学士和硕士学位。他已在实时系统领域工作了 20 年,最近 10 年工作于 GPS 与惯性传感器组合领域并开发了各种 GPS/惯性导航系统。他的工作包括辅助 GPS 接收机的设计、研发和评估。这一工作拓展到各种接收机与低成本惯性元件组合的相关问题上。Foss 现在是 Vehicle Guidance 公司的总经理,该公司是陆上应用的 GPS/惯导系统的制造商。

Peter M. Fyfe 是位于加州阿纳海姆的波音公司的技术人员。他在史蒂文斯理工学院获得了电气工程学士学位,在南加利福尼亚大学获得了硕士学位。他拥有 18 年的有关 GPS 所有三个区段的 GPS 系统工程分析和测试经验。Fyfe 在 1995 年到 2003 年间从事 GPS II 方面的工作,为新的 M 码和 L5 信号的开发和实施做出了贡献。

G. Jeffrey Geier 是摩托罗拉公司个人通信部的技术人员。他拥有 36 年以上的组合导航系统、GPS 导航和信号处理以及完好性监测方面的工作经验。他在 GPS 和 INS 技术方面的经验涉

及军用(C. S. Draper 实验室, TASC, Intermetric 和 Aerospace 公司)以及商用(Trimble 导航和摩托罗拉)应用。在摩托罗拉公司,他开发了支持 FCCE-911 法令的基于移动电话定位的信号处理和导航算法。他致力于汽车应用中 GPS 接收机技术与航位推算传感器的组合。鉴于他技术方面的领导能力,他进入了摩托罗拉科学咨询委员会。Geier 是导航技术论坛的讲师,在全国范围内讲授关于 GPS 接收机与惯性系统组合的双日课程,也曾作为特约讲演者在加拿大卡尔加里大学讲授关于 GPS 与低成本传感器组合的短期课程。他是导航学会和 IEEE 成员,并拥有 28 项与 GPS 相关的专利。Geier 先生获得了麻省理工学院航天航空工程学士和硕士学位。

Christopher J. Hegarty 是 MITRE 公司先进航空系统研发中心的高级主任工程师。他在伍斯特工学院获得了电气工程学士与硕士学位,在乔治-华盛顿大学获得了电气工程博士学位。自 1999 年 9 月至 2000 年 10 月,他在政府机构间人事法令安排之下担任 FAA 民用 GPS 现代化计划的主管。Hegarty 博士是 RTCA 公司计划管理委员会的成员,并担任 RTCA 第 159 特别委员会的副主席。从 1997 年起,他就是《导航》(导航学会的期刊)的编辑。他在乔治华盛顿大学和 GPS 导航技术论坛上讲授数字通信的研究生级课程。他是导航学会 GNSS 2004 的议程主席和 GNSS 2005 的总主席。Hegarty 博士是导航学会早期成就奖(1998 年)、MITRE 公司总裁奖(1999 年)、空中交通控制协会主席成就奖(2000 年)、FAA 感谢奖(2000 年)、RTCA 嘉许证书(2001 年和 2005 年)及政府部门卓越荣誉奖(2005 年)的获得者。

Guenter Hein 是德国慕尼黑 FAF 大学的教授及该校大地测量与导航学院的主任。他在美国兹、斯图加特和达姆施塔特等地的大学研究测量工程和卫星测地学,获得了博士学位并成为一名科学研究助理。在获得重力梯度测量学的任教资格之后,他成为了一名无薪大学教师。在 33 岁的时候,Hein 博士被任命为慕尼黑 FAF 大学的全职教授。他在 GPS 领域的研究工作从他成立的一个研究小组时就开始了,该研究小组从事 RTK GPS 定位和 GPS/INS 组合领域的开拓性研究和开发。因为这项工作,他和他的团队获得了 1988 年导航学会的最佳论文奖。Hein 博士在超过 200 部关于测地学和卫星导航的科学出版物上发表过文章,接受过 100 多项研究基金,是美国国家大地测量所的高级访问科学家和悉尼新南威尔士大学及缅因大学的客座教授,他是各种国内及国际协会的成员。他现在是导航学会卫星部分执行委员会的欧洲技术代表,是 Navtech Seminars 公司的讲师以及 Delft 大学空间科学大师计划(顶级技术研究)的客座教授。Hein 博士是欧委会 GALILEO 信号专题工作组的一员,近年来作为德国谈判和技术专家参加了欧盟与美国有关 GPS 与 GALILEO 互操作性的谈判。2002 年 9 月,他获得了美国导航学会颁发的享有盛望的 Johannes Kepler 奖,这是全世界范围内卫星导航领域的最高奖项。

Len Jacobson 通过创立他自己的公司(全球系统与市场公司)成为一名 GPS 行业、美国政府和法律界的技术、管理及商业发展顾问。他在纽约城市学院获得了电气工程学士学位,在纽约工学院获得了电气工程硕士学位,并在加利福尼亚大学洛杉矶分校和斯坦福行政研究所进行研究生学习。在成为 Interstate Electronics 公司的副总裁之前,他是 ITT 休斯飞机公司和 Magnavox 研究实验室卫星通信与导航方面的系统工程师。他被选为北约工业咨询小组和国防科学委员会小组的成员,研究国际国防贸易政策。他还入选了导航学会理事会的空间代表并两次担任西部地区副主席,同时他还是财政和区域的负责人。Jacobson 两次主持导航学会的国家技术大会(NTM)并作为议程主席。他从“GPS World”杂志创刊时起就担任编委,并担任国防工业协会洛杉矶分会的副主席。他还加入了 AFCEA 和 IEEE。他多次作为 GPS 专家在民事和刑事案件中出庭作证。Len 写过许多关于 GPS 和其他国防方面的文件资料,还出现在 CBS 电视台的“60 分钟”节目上。

Elliott D. Kaplan 是位于马萨诸塞州贝德福德的 MITRE 公司的主任工程师。他在纽约工学院获得了电气工程学士学位,在美国东北大学获得了电气工程硕士学位。Kaplan 先生从 1986 年起就一直参与 GPS 相关的政府项目。目前,他正在从事 GPS JPO 系统工程研究。在此之前,Kaplan 先生领导过系统体系结构/需求定义阶段的 MITRE GPS III 团队。他主编并合著了《GPS 原理与应用》一书的第一版,该书于 1996 年由 Artech House 出版。Kaplan 先生也是导航学会中一名活跃的会员。

Michael King 拥有亚利桑那州立大学电气工程学士和硕士学位。从 1984 年起,在摩托罗拉公司任职期间,他一直从事 GPS 技术开发工作,包括接收机结构、信号处理、算法设计、有效的 ASIC 设计和软件开发。King 先生开发用于辅助 GPS 移动电话定位的接收机结构,算法和空中标准以支持 FCC E-911 法令,并使一系列手机上承载的基于位置的服务得以实现。之前,他领导过用于远程信息系统和定时业界的 GPS 传感器芯片组的技术路线图、结构和开发工作。出于对其技术领导能力的认可,1998 年他入选摩托罗拉科学咨询委员会,2003 年他被任命为 Dan Noble 特别会员,这是摩托罗拉公司授予技术专家的最高荣誉。King 先生 2004 年从摩托罗拉公司退休后,加入了通用动力公司的空间分部,并领导了用于未来国防部空间任务的现代化 GPS 传感器的研发工作。他是导航学会和 IEEE 的会员,拥有 35 项与 GPS 相关的专利。

Joseph L. Leva 拥有密歇根大学工程物理学学士学位和卡内基·梅隆大学的数学硕士学位。在 MITRE 公司,他从事许多与国防相关的项目。他致力于数学分析、数字信号处理和算法开发,做过雷达和定位系统等项目,并且有 20 余年的到达时间和达到时间差处理的经验。Leva 在 GPS 领域发表过许多关于 DOP 概率处理和伪距方程闭式解的论文。从 1999 年到 2005 年,他任“IEEE Transactions for Aerospace and Electronic Systems”导航系统部分的编辑。他也是导航学会的会员。

Willard A. Marquis 是位于 Colorado Springs 的洛克希德·马丁公司 GPS IIR 飞行运营小组的高级资深工程师。他在麻省理工学院获得了航天航空学学士与硕士学位,并在位于玻尔得的科罗拉多大学进修。自从 1982 年进入洛克希德·马丁公司后,Marquis 长期从事一些火箭末级和卫星项目方面的研究。1994 年,他加入了位于科罗拉多州的施里弗空军基地的 GPS Block IIR 飞行运营小组并担任以下职务:导航子系统专家、现代化及特别研究的领导、发射和早期在轨运行的任务规划者。Marquis 是导航学会和美国航天协会的会员,并且是美国航天航空学会(AIAA)的高级会员。他以前是 AIAA 制导、导航和控制技术委员会的会员。

Dennis Milbert 在科罗拉多大学获得物理学学士学位,在俄亥俄州立大学获得测地学硕士和博士学位。他在国家海洋与大气管理局的国家大地测量所工作超过 29 年,被任命为首席大地测量专家。在为联邦政府工作期间,他开发了精度标准、平差软件、重力和大地水准面模型、GPS 动态测量和垂向基准变换。他参加了许多联邦技术和政策工作组,包括最近成立的交通部无线电导航专题工作组和联邦无线电导航计划工作组。他是部际 GPS 执行理事会高级指导小组的候补代表。Milbert 博士为“Manuscripta Geodetica/Bulletin Geodesique”和“Journal of Geodesy”杂志的联合编委会工作了 8 年。他获得过 Kaarina 和 Weikko A. Heiskanen 奖、NOAA 管理者奖、商业部一次铜质奖章及两次银质奖章。他是美国地球物理学联盟、国际测地学协会和导航学会的会员。Milbert 博士最近从政府服务中退出,正在从事 GPS 载波相位定位的研究。

Jim Nagle 是 ICAO 通信、导航和测量部门的主管。他在基于陆地和空间的无线电导航通信系统的设计、管理、运营和国际协调方面有超过 35 年的工作经验。在加入 ICAO 之前,他的职业活动主要是开展支持通信、导航、测量/空中交通管制系统和基础设施的星基技术的评估。Nagle 先生是 Inmarsat 导航项目的组长。该项目开发了 Inmarsat-3 的导航有效载荷。这些卫星提供了美国 WAAS 及 EGNOS 的空间段,并为其他国际星基增强系统提供了基础。

Mike S. Pavloff 在哈佛大学获得了物理学学士学位,在麻省理工学院获得了航天航空学硕士学位。Pavloff 于 1988 年进入 MITRE 公司,成为空间系统分析特别小组的成员。1988 ~ 1994 年,他在哈佛任教,教授微积分和线性代数,并在国家科学基金的资助下,协助设计和撰写新的微积分讲义和教材。1995 年,Pavloff 先生加入 Hughes 空间与通信公司(后来被波音公司收购)并参与了许多卫星导航项目,包括 GPS IIF, GPS III 以及 ICO 项目的导航有效载荷。2004 年,他加入了 Raytheon Santa Barbara 遥感公司(之前也属于 Hughes)并主管可见红外成像辐射计项目。这个项目将作为国家极轨道运行环境卫星系统项目的一部分。

Maarten Uijt de Haag 是俄亥俄大学电气工程与计算机科学系的副教授及航空电子工程中心的主要研究人员。1994 年,他获得了荷兰 Delft 大学电气工程硕士学位,1999 年获得俄亥俄大学电气工程博士学位。他的专业领域是 GPS 软件定义无线电的先进信号处理技术、GPS/INS 组合系统、地形参考导航系统和增强的综合视觉系统。后者包括开发数据完整性监测器使之成为一种使能技术。从 2002 年起,Uijt de Haag 博士就是《导航》(导航学会期刊)的助理编辑。他是导航学会、IEEE、国际光学工程协会和 Sigma Xi 的会员。

Karen Van Dyke 是美国交通部 Volpe 中心的电气工程师。Van Dyke 女士从事过各飞行阶段(包括精密进近)GPS 航空应用的可用性与完好性研究。她是 Volpe 中心的项目带头人,她的团队同时为美国空军和 FAA 设计、开发和实现 GPS RAIM 中断报告系统,用于在预飞行计划期间为飞行员简要指示 GPS 的可用性。Van Dyke 女士在飞行员使用的相似系统和空中交通控制的实现方面,与澳大利亚、德国、巴西和智利等国的航空部门都有过合作。她也在为 FAA WAAS 飞行员通告系统的开发提供支持。最近,她成为 IGEB GPS 完好性故障模式和影响分析项目的带头人。Van Dyke 女士曾担任导航学会主席,她在位于洛厄尔的麻萨诸塞大学获得了电气工程学士和硕士学位。

Phillip W. Ward 是 NAVWARD GPS 咨询公司的总裁。他于 1991 年在得州的达拉斯成立了这家公司。自 1960 年至 1991 年,他是德州仪器国防系统与电子小组技术人员中的高级成员。1967 年至 1970 年,他离开德州仪器进修学习,成为麻省理工学院实验室(现为 Draper 实验室)的技术人员。1958 年,Ward 在位于埃尔帕索城的得克萨斯大学获得电气工程学士学位,1965 年在南卫理大学获得电气工程硕士学位。他还在麻省理工学院学习了计算机科学的研究生课程。Ward 自 1958 年起从事导航领域的工作,自 1976 年起从事 GPS 接收机设计工作。他在德州仪器的几个先进 GPS 接收机研发项目中担任首席系统工程师,为德州仪器研发了 5 代 GPS 接收机,包括 TI 4100 NAVSTAR 导航者复用接收机,这是第一个商用 GPS 接收机。鉴于他在 TI 4100 研发方面的开创性工作,Ward 于 1989 年获得了 Colonel Thomas L. Thurlow 导航奖,这是导航学会授予的最高奖项。在麻省理工学院仪器实验室,他是阿波罗制导计算机设计团队的一员。他曾经是导航学会的主席(1992 ~ 1993 年)和导航学会卫星分会的主席(1994 ~ 1996 年)。Ward 是导航学会中第一名国会研究员(2001 ~ 2002 年)及会士。他也是 IEEE 的高级会员。

Lawrence F. Wiederholt 自 2000 年受雇于 MITRE 公司以来,一直从事 GPS 军用精密进近和着陆系统研究工作。1976 ~ 2000 年,他受雇于马萨诸塞州剑桥的 Intermetrics 公司,期间从事各种导航系统(主要是 GPS 系统)研究。在大部分时间里,他研究 GPS 接收机及使用卡尔曼滤波器 and 最小二乘估计技术的用户导航解决方案、GPS 与其他传感器(如惯性导航系统、气压高度表和多普勒雷达)的组合。这些工作需要进行分析、仿真、实时软件开发、现场测试和评估。这项工作包括 GPS Block IIR 卫星的自主导航功能。Wiederholt 博士还兼职于纽约布法罗的 Calspan 公司和加州 El Segundo 的 Aerospace 公司。Wiederholt 博士拥有威斯康辛-麦迪逊大学电气工程学士、硕士和博士学位以及 Loras 学院的文学士学位。此外,他还是导航学会的会员。

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
1.4 GPS 现代化计划	3
1.5 GALILEO 卫星系统	5
1.6 俄罗斯 GLONASS 系统	5
1.7 中国北斗系统	6
1.8 各种增强措施	7
1.9 市场与应用	7
1.10 本书的组织	10
参考文献	13
第 2 章 卫星导航原理	14
2.1 利用到达时间测量值测距的原理	14
2.2 参考坐标系	19
2.3 卫星轨道的基础知识	23
2.4 利用伪随机噪声码确定位置	36
2.5 求解用户的速度	42
2.6 时间和 GPS	44
参考文献	46
第 3 章 GPS 系统的段	48
3.1 GPS 系统概述	48
3.2 空间段描述	49
3.3 控制段	62
3.4 用户段	74
参考文献	79
第 4 章 GPS 卫星信号的特性	81
4.1 概述	81
4.2 卫星导航中的调制	81
4.3 传统 GPS 信号	88
4.4 导航电文格式	103
4.5 现代化的 GPS 信号	105
4.6 总结	109
参考文献	109

第 5 章	卫星信号的捕获、跟踪与数据解调	111
5.1	概述	111
5.2	GPS 接收机的码和载波跟踪	112
5.3	载波跟踪环	119
5.4	码跟踪环	125
5.5	环路滤波器	130
5.6	测量误差和跟踪门限	134
5.7	伪距、 Δ 伪距和积分多普勒的形成	148
5.8	信号捕获	162
5.9	接收机初始工作的顺序	172
5.10	数据解调	173
5.11	特殊的基带功能	173
5.12	数字处理的使用	175
5.13	关于室内应用	176
5.14	无码与半无码处理	178
	参考文献	179
第 6 章	干扰、多径和闪烁	181
6.1	概述	181
6.2	射频干扰	181
6.3	多径	208
6.4	电离层闪烁	220
	参考文献	222
第 7 章	独立式 GPS 的性能	224
7.1	引言	224
7.2	测量误差	224
7.3	PVT 估计概念	239
7.4	GPS 可用性	248
7.5	GPS 完好性	257
7.6	连续性	268
7.7	测得的性能	269
	参考文献	280
第 8 章	差分 GPS	284
8.1	引言	284
8.2	GPS 误差的空间和时间相关特性	285
8.3	基于码的技术	293
8.4	基于载波的技术	297
8.5	电文格式	317
8.6	实例	321
	参考文献	341

第 9 章	GPS 与其他传感器的组合及网络辅助	346
9.1	概述	346
9.2	GPS/惯性导航组合	346
9.3	陆路车辆系统中的传感器组合	370
9.4	网络辅助	393
	参考文献	415
第 10 章	伽利略系统	420
10.1	GALILEO 计划的目的	420
10.2	GALILEO 服务与性能	420
10.3	GALILEO 频率规划和信号设计	423
10.4	GPS 与 GALILEO 的互操作	434
10.5	系统结构	435
10.6	GALILEO SAR 体系结构	445
10.7	GALILEO 开发计划	446
	参考文献	447
第 11 章	其他卫星导航系统	448
11.1	俄罗斯 GLONASS 系统	448
11.2	中国北斗卫星导航系统	461
11.3	日本 QZSS 计划	468
	致谢	471
	参考文献	472
第 12 章	GNSS 的市场和应用	476
12.1	GNSS: 基于使能技术的综合市场	476
12.2	GNSS 民用导航应用	480
12.3	测绘、地图绘制和地理信息系统中的 GNSS	485
12.4	基于 GNSS 产品的娱乐市场	487
12.5	GNSS 时间传递	487
12.6	差分应用和服务	487
12.7	GNSS 和远程信息系统及 LBS	488
12.8	GNSS 的创造性应用	489
12.9	政府和军事应用	490
12.10	特定市场的用户设备需求	492
12.11	GNSS 行业的财务预测	494
	参考文献	495
附录 A	最小二乘和加权最小二乘估计	496
附录 B	频率源稳定度的测量方法	498
附录 C	自由空间传播损耗	501
索引	505

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个地方的科学”。在日常生活中,我们每一个人都会进行某种形式的导航。驱车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,这些技能需要利用我们的眼睛、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、预期的航向或到达期望目的地所需的时间。此时,便要用不同于地标的导航装置。这些导航装置也许是一个简单的时钟,以确定经过已知距离的速度;或者是汽车的里程表,以随时保持行驶的距离。其他一些导航装置要发射电子信号,因而更复杂一些。这些导航装置称为无线电导航装置。

人们(后面称之为用户)利用一个或多个无线电导航装置的信号能够计算出其位置(某些无线电导航装置还提供速度测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并计算出位置。接收机为用户完成必要的解算(例如距离、方位、估计的到达时间),以将用户导航到所希望的位置。在一些应用中,接收机有可能只是部分处理所接收到的信号,而导航解算则在其他地方完成。

导航装置各式各样,本书把它们区分为陆基和星基两类。一般而言,陆基无线电导航装置的精度与其工作频率成正比。高精度的系统一般在相对短的波长上发射,用户必须保持在视线方向(LOS)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线方向的限制,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^①,它们提供二维的高精度定位服务。然而,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° 纬度上的定位速率将改善到平均每 30 分钟一次^[1]。这两种系统的限制是,每一次定位都需要大约 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,因为它的速度很低,但不适合于飞机和高动态用户^[2]。正是因为这些缺点,导致了美国全球定位系统(GPS)的发展。

1.2 GPS 计划简史

20 世纪 60 年代初期,包括国防部(DOD)、国家航空航天局(NASA)和交通部(DOT)在内的几个美国政府机构都对发展用于三维定位的卫星系统产生了兴趣。这些机构认为,最佳系统应具有如下特性:全球覆盖、连续/全天候工作、能为高动态平台提供服务,以及高精度。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(如上节所述),海军打算增强子午仪或者发展另一种卫星导航系统,使之具有上述所希望的能力。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

^① 子午仪系统已于 1996 年 12 月 31 日由美国政府停用,而 Tsikada 系统在本书写作时还在运行。

计划记做 Timation。然后对 Timation 卫星做了修改,以提供进行二维定位的测距能力。Timation 使用侧音调制来进行卫星至用户的测距^[3-5]。

在考虑增强子午仪和致力于 Timation 的同时,空军也在进行记做 621B 系统的卫星定位系统的概念研究。军方设想 621B 系统的卫星将位于倾角为 0° 、 30° 和 60° 的椭圆轨道上,研究了许多不同的卫星数量(15~20 颗)及其轨道布局,建议使用数字信号的伪随机噪声(PRN)调制来进行测距。621B 系统预期提供三维覆盖和连续的全球服务。这种概念和操作技术在 Yuma 试验场进行了证实,用的是由伪卫星(pseudolites,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^[3-6]。此外,在新泽西州 Monmouth 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。陆军探讨的结果是推荐利用 PRN 调制来实现测距^[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,拟将各军种的独立研制工作统一起来,以便形成一个单独的联合使用的系统。OSD 还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开发制定规划。由于这些工作,形成了 NAVSTAR GPS 的系统概念。NAVSTAR GPS 计划是由位于加州 E1 Segundo 的 GPS 联合计划办公室(JPO)制订的^[5]。在写作本书时,GPS JPO 还在继续监管新卫星、地面控制设备和大多数美国军用用户接收机的研制和生产。NAVSTAR GPS 系统如今普遍简称为 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。该系统向具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 还广播一种形式的协调世界时(UTC)。标称的 GPS 卫星星座由安排在 6 个轨道面上的 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 GPS 时间基准同步的。卫星采用码分多址(CDMA)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,但所使用的测距码与其他卫星所使用的不一样。这些码的选择依据是它们两两之间有较好的互相关特性。每颗卫星产生一个称为粗捕码或 C/A 码的短码和一个称为精码或 P(Y)码的长码(即将出现另外的信号。卫星信号特性将在第 4 章中讨论)。导航数据为接收机提供了确定卫星在信号发射时刻的位置的手段,而测距码使用户接收机能够确定信号的传输(即传播)延时,从而确定卫星到用户的距离。这种技术要求用户的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 距离。如果接收机时钟已经与卫星时钟同步,则只需要 3 个距离观测量。然而为了使接收机的成本、复杂性和尺寸减至最小,导航接收机中一般使用石英钟。因此,为确定用户的纬度、经度、高度和接收机时钟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准确已知,便只需要 4 颗以下的卫星。第 2 章将详细叙述 TOA 测距以及用户位置、速度与时间(PVT)的确定。

GPS 是一种双重用途的系统,即提供民用和军用两种不同的服务,称为标准定位服务(SPS)和精密定位服务(PPS)。SPS 是指定为民用社团使用的,而 PPS 是指定为美国授权的军方用户和选定的政府机构用户使用的。GPS PPS 的接入是通过加密而受控的。GPS 于 1993 年 12 月达

到初始运行能力(IOC),那时的原型和产品卫星加起来已有24颗可用,定位/授时服务符合相关的规定预测精度。GPS于1995年初达到全运行能力(FOC),24颗产品卫星星座已全部就位,对地面控制区段及其与星座交互作用的大量测试也已完成。下面对SPS和PPS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(2 drms,95%);在垂直平面内,27.7 m(95%)。距离均方根值(drms)是在导航中常用的测度。drms值的两倍也即2 drms是一个圆的半径,这个圆中至少包含在任何一个地方用一种系统(这里是PPS)所获得的所有可能定位值的95%。PPS提供的UTC时间传递精度在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)^[7,8];速度测量精度规定为0.2 m/s(95%)^[4]。PPS测量性能将在7.7节介绍。

如前所述,PPS主要打算用于军事和选定的政府机构用户;也允许民用,但只能是得到美国国防部特别批准的用户才行。前述PPS定位精度的获得是受控的,其控制通过称为反欺骗(Antispoofing,AS)和选择可用性(Selective Availability,SA)的两种加密特性来实现。AS是一种旨在通过对军用信号的加密而抵抗欺骗式干扰的机制。欺骗式干扰是一种技术,其中敌方复现一颗或更多卫星的测距码、导航数据信号和载波多普勒效应,以图欺骗受害的接收机。SA通过使卫星时钟发生“颤动”,而使TOA测量精度变差,以有意降低SPS用户精度。此外,SA还会在所广播的导航数据参数中引入误差^[9]。SA已于2000年5月1日起停用,当前美国政府的政策是保持其关闭状态。当其被激活时,PPS用户通过密码机制去除SA的影响^[4]。

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,免收直接的费用。对SPS的使用未设任何限制。这种服务规定提供的预测精度为:在水平面内,优于13 m(95%);在垂直平面内,22 m(95%)(全球覆盖,只有空间信号误差)。UTC(USNO)时间广播精度规定在40 ns(95%)以内^[10]。典型的SPS测量性能要比规定精度好得多(详见7.7节)。

在本书写作之时,SPS已成为占主导地位卫星导航服务,为全世界数百万用户所使用。

1.4 GPS现代化计划

1999年1月,美国政府宣布了一项新的GPS现代化提案,要求在新的GPS卫星中增加两个民用信号^[11]:L2C和L5。L2C信号位于L2频率上,将用于非生命安全类的应用;L5信号位于航空无线电导航服务(ARNS)的1176.45 MHz波段,L5信号预定用于生命安全应用。这些新增信号将为SPS用户提供校正电离层延迟的能力,从而大大增加民用用户的精度。通过使用所有三个信号(L1 C/A,L2C和L5)的载波相位以及差分处理技术,可以很快获得很高的用户精度(毫米量级)(电离层延迟及相关的补偿技术将在第7章叙述,而差分处理将在第8章讨论)。这些新增信号也将增加接收机在干扰下的鲁棒性。如果一个信号遇到了强干扰,那么接收机就可以切换到另一个信号上。这些新增信号将为全球的民用、商用和科研用户提供帮助,这是美国政府的意图。例如,L1(也位于ARNS波段)和L5组合使用将大大增强民用航空。

20世纪90年代中后期,一种新的称为M码的军用信号被开发出来用于PPS。这一信号将在L1和L2两个频率上发射,其频谱与这些波段上的GPS民用信号相分离。频谱的分离允许使

用无干扰的更高功率的 M 码模式,以增加抗干扰性。此外, M 码与传统 P(Y)码相比将提供可靠的捕获、提高的精度和安全性。

第 4 章将具体描述前述传统的[C/A 码和 P(Y)码]和现代化的信号。

在本书写作时,第一颗 Block IIR-M(R 表示补充, M 表示现代化)卫星的发射已列入日程,预计 M 码和 L2C 将投入使用(Block IIR-M 也会广播所有的传统信号)。Block IIF(F 表示继续)卫星计划于 2007 年发射,将发射所有信号,包括 L5。图 1.1 给出了 GPS 信号的演变进程;图 1.2 和图 1.3 分别是 Block IIR-M 和 Block IIF 卫星的概图。

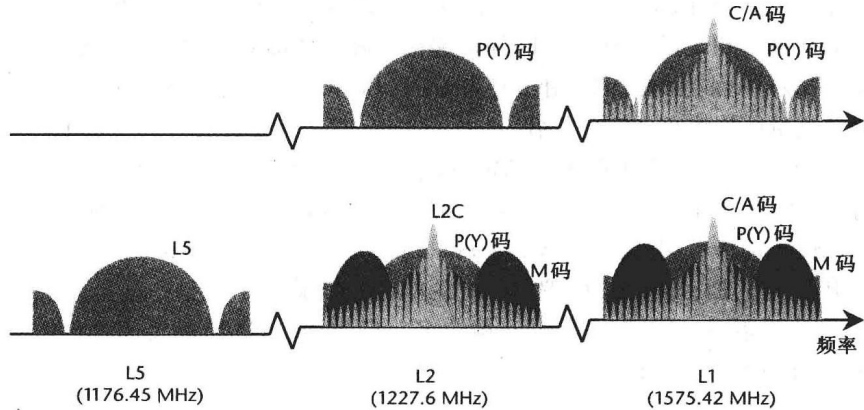


图 1.1 GPS 信号的演进

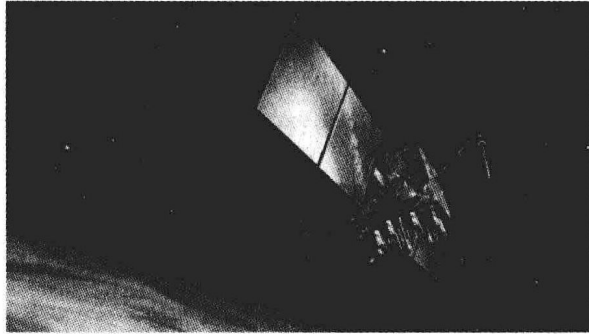


图 1.2 Block IIR-M 卫星(Lockheed Martin 公司授权刊印)

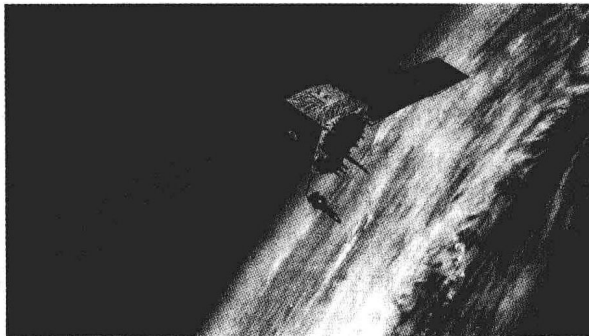


图 1.3 Block IIF 卫星(Boeing 公司授权刊印)

在本书写作时, GPS III 计划正在进行之中。该计划于 2000 年提出构想, 要重新评估整个 GPS 体系结构, 并制定满足直到 2030 年的民用和军用户需求的体系结构。GPS III 预计将提供亚米级定位精度, 更高的定时精度, 系统完好性方案, 高数据容量的星间链路能力, 以及更高的信号功率, 以满足军用抗干扰的需求。在本书写作时, 第 1 颗 GPS III 卫星计划于美国政府 2013 年发射升空。

1.5 GALILEO 卫星系统

1998 年, 欧盟(EU)决定建立一个独立于 GPS 的、专门为全球民用用户设计的卫星导航系统。GALILEO 系统一旦建成, 将向全球用户提供多种形式的服务。计划中的五项服务是:

- 公开服务, 不直接向用户收费。
- 商业服务, 将增值数据结合到高精度的定位服务中。
- 生命安全(SOL)服务, 用于苛求安全的用户。
- 公共特许服务, 仅为要求更高保护级别(例如在干扰或人为干扰下增强的鲁棒性)的政府授权用户提供服务。
- 对搜救服务的支持。

预计 SOL 服务将对所接收卫星信号进行鉴定以保证它们确实是由 GALILEO 所广播的。而且, SOL 服务将包括完好性监测和通知; 亦即根据规范在 SOL 信号的安全使用得不到保证时将及时向用户发布告警信息。

GALILEO 系统计划将包括由 30 颗卫星组成的星座和遍布全球的地面控制区段。图 1.4 是 GALILEO 卫星的概图。GALILEO 系统的一个主要目标是与 GPS 系统完全兼容^[12]。为了确保两个系统间的互操作性, 正在采取一些措施。最基本的互操作性因素包括: 信号结构、大地坐标参考框架以及时间参考系。

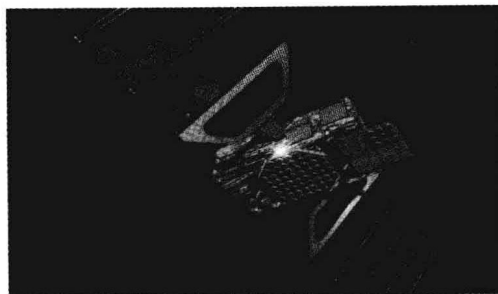


图 1.4 GALILEO 卫星(ESA 授权刊印)

GALILEO 系统计划于 2008 年开始运行。第 10 章将具体介绍 GALILEO 系统, 包括卫星信号特性。

1.6 俄罗斯 GLONASS 系统

全球导航卫星系统(GLONASS)是俄罗斯对应于 GPS 的类似系统。该系统由中轨道(MEO)卫星星座、地面控制区段和用户设备组成, 在 11.1 节将加以详述。在写作本书时, GLONASS 正