

全球卫星导航系统

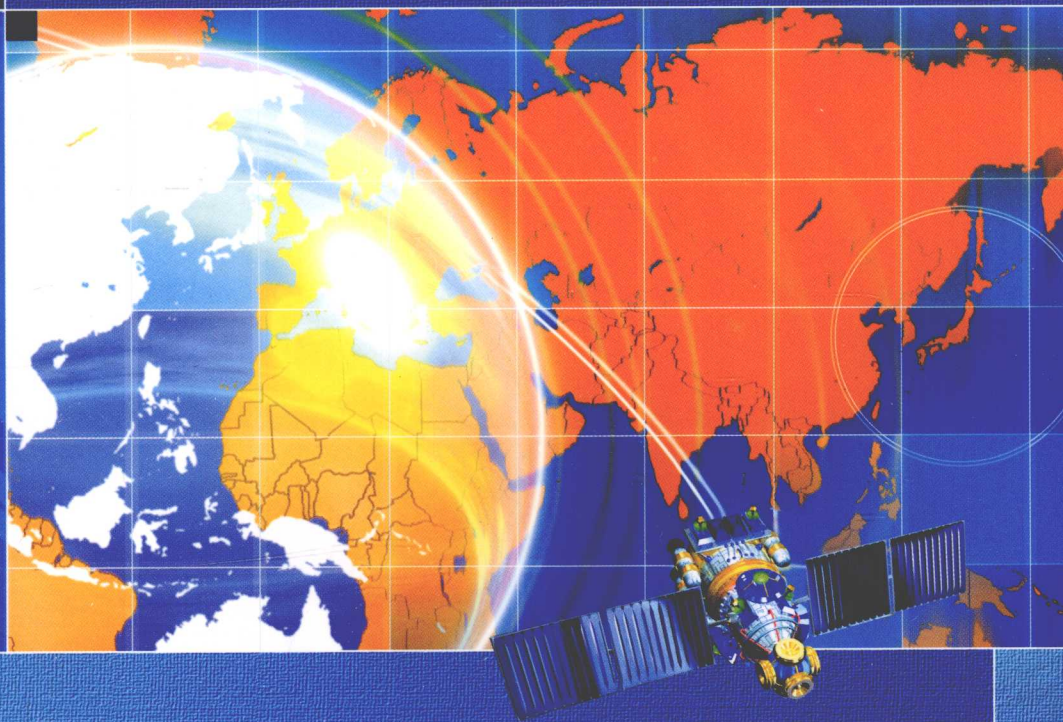
GPS, GLONASS, Galileo及其他系统

[奥] 霍夫曼-韦伦霍夫 利希特内格尔 瓦斯勒 著

程鹏飞 蔡艳辉 文汉江 王解先 姚宜斌 王华 译

GNSS—Global Navigation Satellite Systems
GPS, GLONASS, Galileo & more

Hofmann-Wellenhof Lichtenegger Wasle



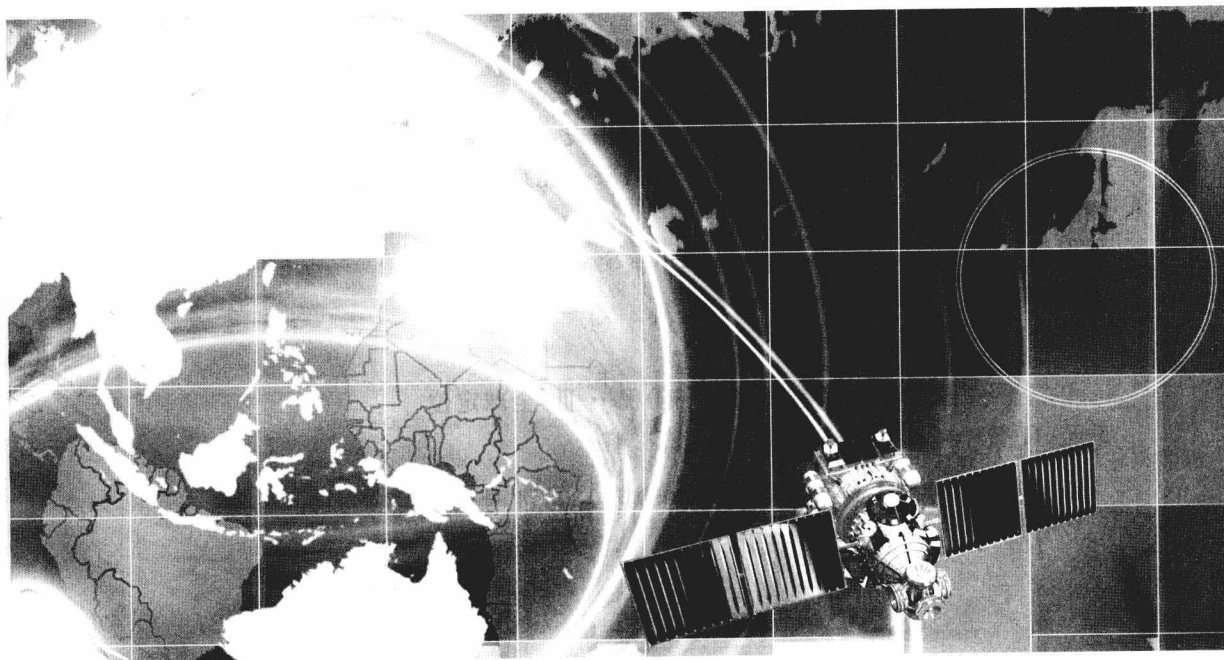
测绘出版社

全球卫星导航系统

GPS, GLONASS, Galileo及其他系统

[奥] 伯恩哈德·霍夫曼-韦伦霍夫 赫伯特·利希特内格尔 埃尔马·瓦斯勒 著

程鹏飞 蔡艳辉 文汉江 王解先 姚宜斌 王华 译



GNSS—Global Navigation Satellite Systems
GPS, GLONASS, Galileo & more

Bernhard Hofmann-Wellenhof Herbert Lichtenegger Elmar Wasle

测绘出版社

• 北京 •

著作权合同登记号:01-2009-4760

Translation from the English language edition:
GNSS—*Global Navigation Satellite Systems* by
Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, Elmar Wasle
Copyright © Springer-Verlag 2008
All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

全球卫星导航系统/(奥)霍夫曼—韦伦霍夫,(奥)
利希特内格尔,(奥)瓦斯勒著;程鹏飞等译.—北京:
测绘出版社,2009.8

书名原文:Global Navigation Satellite Systems——
GPS, GLONASS, Galileo & More
ISBN 978-7-5030-1935-7

I. 全… II. ①霍…②利…③瓦…④程… III. 全球定位
系统(GPS)—高等学校—教材 IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 139814 号

责任编辑 贾晓林 责任校对 董玉珍 李 艳 封面设计 李 伟

出版发行	测绘出版社	邮政编码	100045
社 址	北京市西城区复外三里河路 50 号	网 址	www.sinomaps.com
电 话	010-68531160 010-68512386	经 销	新华书店
印 刷	北京建筑工业印刷厂	印 张	27.25
成品规格	169mm×239mm		
字 数	530 千字	印 次	2009 年 8 月第 1 次印刷
版 次	2009 年 8 月第 1 版	定 价	50.00 元
印 数	0001—3000		

书 号 ISBN 978-7-5030-1935-7/P·444

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

译者序

2007年12月在上海举行了“上海国际导航产业化与科技发展论坛暨国际导航技术与产品展示”，我作为大会科学技术委员会的成员参加了会议。会议期间遇见了我的博士生导师——奥地利国家导航研究所创始人、格拉茨技术大学卫星大地测量与导航研究所的所长 B. Hofmann-Wellenhof 教授。我的导师将 Springer 出版社刚刚出版的《GNSS—GPS, GLONASS, Galileo & more》一书作为礼物送给我。我草草地浏览了该书的目录，立刻发觉这本书较导师早年撰写的被导航界誉为“GPS 圣经”的《GPS—Theory and Practice》一书增加了许多内容，更具有参考价值。于是我萌发了将此书翻译给中国读者的念头。这一想法得到了恩师的赞同和支持。

从上海返回北京后，我与测绘出版社取得了联系。测绘出版社在对本书作了谨慎地评估，并与 Springer 出版社取得授权许可后立即给了我积极响应，并建议我尽快完成本书的翻译工作，使本书的中文版能够在 2009 年与读者见面。为了尽快完成翻译工作，我邀请了蔡艳辉副研究员、文汉江研究员、王解先教授、姚宜斌教授、王华硕士与我共同完成此项工作。其实，我之所以选择他们是有原因的：蔡艳辉是一位很杰出的年轻学者，我作为他的硕士生导师和博士生导师，对他关于卫星导航定位领域知识的全面了解和深刻理解深信不疑；文汉江研究员曾与我在奥地利格拉茨技术大学攻读博士学位时，聆听过本书第一和第二作者所授的卫星导航定位课程，对作者的写作风格了然于胸；王解先教授任职于同济大学，在卫星导航定位领域从事理论研究和实践已逾二十年，在我国享有盛誉；姚宜斌教授任职于武汉大学测绘学院，在卫星导航定位领域是一位很有前途的青年学者；王华硕士是一位工作认真、仔细、任劳任怨、英文水平很高且文笔流畅的女士，作为她的硕士生导师，我对她关于卫星导航定位的知识以及毕业后在继续从事相关科研工作所表现出的能力很有信心。本书翻译工作的顺利完成证明了我的选择是多么正确！

原著的写作风格简单易懂，在翻译时我们尽量保持这种风格。在保证原文原义的基础上，少数地方采用了意译。原著的章节分级采用了三级目录，为了使读者更有条理地阅读此书，我们将原著的章节分级目录增加到四级，即将第三级中以黑体表示的主题内容作为第四级。由于时间紧张，我们将原著中的主题词索引部分简化为术语中英文对照。插图的翻译是直接原著作者提

供的 CorelDRAW 制作的插图中进行的。

本书翻译过程中得到了丁朋辉、黄运乾、徐彦田、朱祥娥、任纪庆、李玮等硕士生的帮助,他们为本书诸如插图的翻译、参考文献的输入和验证等烦琐的工作提供了及时的支持。在此向他们表示感谢!

由于我们翻译水平有限,书中难免存在翻译不当之处,敬请读者批评指正!

程鹏飞

2008年8月31日

前 言

几年前,欧洲 Galileo 系统的发展已初具轮廓,但诸多投稿文章中的困惑反映出对该系统认识上的许多问题。鉴于此,我同 Springer 出版社讨论出版一本关于 Galileo 系统的书,经过协商,Springer 成功地说服我将计划撰写的 Galileo 一书与已出版的《GPS—Theory and Practice》一书合并,虽然最初我已经声明《GPS—Theory and Practice》一书的第五版是最后版本。在与 Galileo 系统一书合并时,通用内容部分作适当更新就可以作为新书内容。尽管在很长一段时间内,由于可用卫星的数目问题,GLONASS 系统不能够得以很好的保持,但现在却清晰显现出即将出现的复兴迹象,所以本书自然要对 GLONASS 系统作适当介绍。

采用《Global Navigation Satellite Systems—GPS, GLONASS, Galileo & more》作为本书书名是否恰当?这个简单的问题却不是那么容易回答。1998 年联合国召开了第三届太空探索与和平使用大会,该会议关于卫星导航与位置系统的框架文件 A/CONF. 184/BP/4 给出一个定义:“全球卫星导航系统(GNSS)是一个能在地球表面或近地空间的任何地点为适当装备的用户提供 24 小时、三维坐标和速度以及时间信息的空基无线电定位系统,包括一个或多个卫星星座及其支持特定工作所需的增强系统。”这一定义是 GPS 和 GLONASS 这两个(当前)重要的卫星导航系统的续延。

书名《Global Navigation Satellite Systems—GPS, GLONASS, Galileo & more》很适合这个定义。然而,由于“GNSS”这一缩写并不唯一,因此这里有必要多说几句。大多数情况下,缩写词“GNSS”用于全球卫星导航系统,问题是“system”这个词是否用复数形式。有些作者,如《Inside GNSS》杂志的编辑 Glen Gibbons,甚至强调要写成“GNSSes”。鉴于存在多个定位系统的事实,“system”的复数形式是正确的,例如 GPS 和 GLONASS 这些系统中的每个都是全球卫星导航系统。

然而,从上面定义的严格意义上讲,将这些系统一并考虑并用一个统一的名词(现在是单数了!)表示,就产生了“Global Navigation Satellite System”这一术语。

书名的副标题尚需讨论。既然在“Galileo”和“& more”之间没有连续的逗号出现(那样看起来很不美观),“Galileo & more”就形成了一个实体。伽利略当前的研发与部署阶段与中国的北斗或印度的 IRNSS 等其他系统的相似性可以证实这一点。

本书是大学的入门教科书。本书尽可能用通俗的语言描述 GNSS 各种参考系统、卫星轨道、卫星信号、观测值、定位数学模型、数据处理以及数据转换。至于 GPS、GLONASS、Galileo 以及其他单个系统,主要描述其特定的参考系统、服务、空间段与控制段、信号结构等。因此,本书涵盖了导航系统未来可能的发展,的确是一本 GNSS 基本参考书。

读者需要知道一个事实,即本书所有作者的主要学术背景都是大地测量学,甚至他们共同的母校都是格拉茨技术大学。Herbert Lichtenegger 和我是格拉茨技术大学卫星大地测量与导航研究所的成员。Elmar Wasle 自 2001 年受雇于 Tele-Consult Austria GmbH,该公司是一家从事国家与国际 GNSS 研究与发展计划的公司。Elmar Wasle 也同样在卫星大地测量与导航研究所定期开设伽利略课程。强调这一点很重要,因为大地测量背景与大地测量的前景在 GNSS 领域有时会占主导地位。

从美国国家大地测量局退休的 Benjamin W. Remondi 博士值得信任与感谢。他几乎认真阅读并修改了本书全部内容。对他的诸多建议与改进、严格评论与提议我深表感激。

格拉茨技术大学卫星大地测量与导航研究所的 Dipl. -Ing. Hans-Peter Ranner 在本书撰写初期给予了大力支持。他在许多方面提供帮助,如收集合适的参考文献,提出一些公式推导的方法,或重新计算验证一些数值实例等。

格拉茨技术大学卫星大地测量与导航研究所的 Manfred Wieser 博士、教授还专门针对如何正确解释与深刻理解旋转矩阵为我们做了专题讲座。

本书索引利用 Elmar Wasle 编制的计算机程序生成。这个程序也帮助探查书中的拼写错误。

本书的文本基于文本系统 LATEX 编译而成,插图则利用 CorelDRAW 完成。我们也对 Springer 出版社的建设性建议与合作深表感谢!

B. Hofmann-Wellenhof

2007 年 4 月

本书导读

本书共分为 14 章,主要内容如下:

第一章简单回顾测量的起源及全球测量技术的发展历程。此外,对卫星定位与导航技术的主要研究内容进行了阐述。

第二章介绍空间坐标系统和时间参考系统,包括天球参考框架和地球参考框架及其转换,不同的时间定义及其转换。

第三章阐述卫星轨道。重点阐述轨道表示、开普勒轨道确定和受摄运动,同时对轨道数据的分发也进行了介绍。

第四章对卫星信号进行了一般性的描述,包括信号结构、各种信号组成的基本原理及信号处理的基本原则。

第五章主要讲述观测量的有关内容。介绍了码伪距、相位伪距和多普勒数据的获取,以及相位伪距和扩码伪距与相位数据的数据组合,并对观测值的各种误差源进行了分析,包括大气影响、相对论效应、天线相位中心影响及多路径效应。

第六章介绍定位的数学模型。在对各种观测值数学模型分析的基础上,导出基于各种观测值组合的单点定位、差分定位及相对定位的数学模型。

第七章介绍数据处理。内容包括周跳的探测与修复、整周模糊度的确定和平差模型。

第八章是基准转换,介绍了 GNSS 结果与地方基准的关系,给出了必要的转换公式,并对 GNSS 与地面数据的联合应用进行了介绍。

第九章到第十一章分别介绍了 GPS、GLONASS 和 Galileo 系统。讲述了系统各自的坐标与时间参考系统、服务、系统结构和信号结构。

第十二章对其他系统的发展进行了介绍,包括北斗、QZSS 等。此外,还对差分系统、WAAS 和 EGNOS 等增强系统,以及其他系统的基本概念进行了介绍。

第十三章介绍 GNSS 的一些应用。在众多的 GNSS 应用中,以概括的方式介绍了定位、姿态以及时间传递。同时还介绍了星基系统间的组合及与其他系统,如惯性导航系统(INS)的组合应用。

第十四章对本书进行了总结和展望。介绍了 GNSS 系统的将来以及用户如何从正在发展的系统服务中获益,指出 GNSS 的未来将受到 GNSS 市场的国际竞争影响。

除了以上内容之外,本书还包含缩略语和术语中英文对照。能帮助读者立即

找到书中感兴趣的主体。在缩略语列表中,说明的第一个字母总是大写,除此之外,大写字母通常只用在描述独特的组织或唯一设定的系统。表示向量或矩阵的符号用黑体字。用上标“T”表示矩阵转置。两个向量间的内积或标量积用“ \cdot ”来表示。向量的范数,即向量的长度,用两条竖线“ $\|$ ”表示。不涉及矩阵的向量视其方便写成行向量或列向量。

大地测量学家在本书中找不到表示精度数据或精确度数据的传统“ \pm ”符号,该符号毫无疑问是被隐含其中的。因此,如果有一段长度为 100 m、精度为 0.05 m 的观测距离,大地测量表示法(100 \pm 0.05) m 意味着这段距离的解算值为 99.95 m~100.05 m。

文中的互联网引用如果地址中包含“www”则省略“http://”部分,因此,www.esa.int 意味着 http://www.esa.int。同样,文中也没给出保证网址正确的日期。这意味着在 2007 年 4 月书稿提交给出版社前,本书所列网址都是正常工作的。

通常,文中给出的网址在参考文献中并不重复罗列。因此,参考文献列表并不能完全表示出所引用的文献。

网络资源的使用会由于如下原因而带来麻烦:当在网上搜索简单明了的解释或定义时,会找到太多出处不同的相同描述,因此就会出现无法确定哪个是更早的以及最早资源的问题。这种情况下,有时为避免可能的利益冲突,需做出省略对该资源引用的决定,这意味着本书有些短语或句子来自于网上资料。另一方面,本书一经发行,也会并必定将会作为一些网页的输入资源。

单词的拼写(美式)采自于韦伯斯特英语词典“Webster's Dictionary of the English Language”(第三版,完整版),该词典电子版也可参阅 www.merriam-webster.com 网址。除了典型差异外,如美语中的“leveling”与英式英文的“leveling”,对比各种词典时也可能导致其他分歧。韦伯斯特英语词典总是将否定词“non”与随后单词间连字符省略,除非其后是大写字母。因此,“nongravitational”、“nonpropulsed”、“nonsimultaneity”以及“non-European”都是相应的拼写。

对于参考文献,本书原则上不引用 1990 年以前发表的资料,但对起到基础作用的某些资料也有例外。

最后声明,作者对书中涉及的产品和制造商没有针对性,以商业公司和产品的名义发布的内容也不代表本书作者认同。原则上,本书尽可能回避具体的产品和制造商,只提及那些在科技发展中起到关键作用且具有历史意义的产品和制造商。

B. Hofmann-Wellenhof H. Lichtenegger E. Wasle

2007 年 4 月

目 录

第 1 章 引 论	(1)
§ 1.1 测量的起源	(1)
§ 1.2 全球测量技术的发展	(1)
1.2.1 全球光学三角测量	(1)
1.2.2 全球电磁波三边测量	(2)
1.2.3 星基定位	(2)
§ 1.3 卫星定位与导航	(6)
1.3.1 位置测定	(6)
1.3.2 速度测定	(7)
1.3.3 姿态测定	(8)
1.3.4 术语	(8)
第 2 章 参考系统	(10)
§ 2.1 概述	(10)
§ 2.2 坐标系统	(11)
2.2.1 定义	(11)
2.2.2 天球坐标框架与地球坐标框架的转换	(13)
2.2.3 地球坐标框架之间的转换	(16)
§ 2.3 时间系统	(16)
2.3.1 定义	(16)
2.3.2 时间转换	(17)
2.3.3 历法	(18)
第 3 章 卫星轨道	(20)
§ 3.1 概述	(20)
§ 3.2 轨道描述	(20)
3.2.1 开普勒运动	(20)
3.2.2 受摄运动	(25)
3.2.3 摄动加速度	(26)
§ 3.3 轨道确定	(29)

3.3.1	开普勒轨道确定	(30)
3.3.2	摄动轨道确定	(32)
§ 3.4	轨道发布	(34)
3.4.1	跟踪网	(34)
3.4.2	星历	(36)
第 4 章	卫星信号	(40)
§ 4.1	概述	(40)
4.1.1	物理基础	(40)
4.1.2	传播效应	(44)
4.1.3	频率标准	(50)
§ 4.2	通用信号结构	(50)
4.2.1	信号设计参数	(50)
4.2.2	载波频率	(54)
4.2.3	测距码层	(55)
4.2.4	数据链层	(62)
4.2.5	卫星复用	(63)
§ 4.3	通用信号处理	(63)
4.3.1	接收机设计	(63)
4.3.2	射频前端	(65)
4.3.3	数字信号处理	(68)
4.3.4	导航处理器	(78)
第 5 章	观测量	(80)
§ 5.1	数据获取	(80)
5.1.1	码伪距	(80)
5.1.2	相位伪距	(81)
5.1.3	多普勒数据	(82)
5.1.4	偏差和噪声	(83)
§ 5.2	数据组合	(85)
5.2.1	相位伪距线性组合	(85)
5.2.2	码伪距平滑	(86)
§ 5.3	大气影响	(88)
5.3.1	相速和群速	(88)
5.3.2	电离层折射	(90)

5.3.3	对流层折射	(97)
5.3.4	大气层监测	(105)
§ 5.4	相对论效应	(107)
5.4.1	狭义相对论	(107)
5.4.2	广义相对论	(109)
5.4.3	GNSS 的相对论效应	(110)
§ 5.5	天线相位中心偏差和变化	(112)
5.5.1	概述	(112)
5.5.2	相对天线相位中心改正	(113)
5.5.3	绝对天线相位中心改正	(114)
5.5.4	数据研究结果	(115)
§ 5.6	多路径	(117)
5.6.1	概述	(117)
5.6.2	数学模型	(118)
5.6.3	多路径效应消减	(120)
第 6 章	定位数学模型	(122)
§ 6.1	单点定位	(122)
6.1.1	码伪距单点定位	(122)
6.1.2	载波相位单点定位	(123)
6.1.3	多普勒单点定位	(125)
6.1.4	精密单点定位	(126)
§ 6.2	差分定位	(128)
6.2.1	基本概念	(128)
6.2.2	码伪距 DGNS	(129)
6.2.3	相位伪距 DGNS	(130)
6.2.4	局域 DGNS	(130)
§ 6.3	相对定位	(131)
6.3.1	基本概念	(131)
6.3.2	相位差分	(132)
6.3.3	相位组合的相关性	(135)
6.3.4	静态相对定位	(139)
6.3.5	动态相对定位	(140)
6.3.6	伪动态相对定位	(142)
6.3.7	虚拟参考站(VRS)	(142)

第 7 章 数据处理	(146)
§ 7.1 数据预处理	(146)
7.1.1 数据准备	(146)
7.1.2 周跳探测与修复	(147)
§ 7.2 整周模糊度的确定	(153)
7.2.1 概述	(153)
7.2.2 基本方法	(156)
7.2.3 搜索技术	(162)
7.2.4 模糊度验证	(178)
§ 7.3 平差、滤波和质量评估	(179)
7.3.1 基本原理	(179)
7.3.2 数学模型的线性化	(188)
7.3.3 网平差	(193)
7.3.4 精度衰减因子	(197)
7.3.5 质量参数	(200)
7.3.6 准确度指标	(205)
第 8 章 数据转换	(209)
§ 8.1 概述	(209)
§ 8.2 坐标转换	(209)
8.2.1 直角坐标和大地坐标的转换	(209)
8.2.2 全球坐标和局部坐标的转换	(212)
8.2.3 大地坐标和平面坐标的转换	(213)
8.2.4 高程转换	(218)
§ 8.3 基准转换	(221)
8.3.1 三维转换	(221)
8.3.2 二维转换	(224)
8.3.3 一维转换	(226)
§ 8.4 GNSS 与地面数据的联合平差	(228)
8.4.1 公共坐标系统	(228)
8.4.2 观测量的表示	(228)
第 9 章 GPS	(232)
§ 9.1 概述	(232)
9.1.1 历史回顾	(232)

9.1.2 项目阶段	(232)
9.1.3 管理和运营	(233)
§ 9.2 参考系统	(235)
9.2.1 坐标系	(235)
9.2.2 时间系统	(236)
§ 9.3 GPS 服务	(237)
9.3.1 标准定位服务	(238)
9.3.2 精密定位服务	(238)
9.3.3 精度和访问限制	(239)
§ 9.4 GPS 系统结构	(242)
9.4.1 空间段	(242)
9.4.2 控制段	(244)
§ 9.5 信号结构	(246)
9.5.1 载波频率	(247)
9.5.2 PRN 码和调制	(248)
9.5.3 导航电文	(253)
§ 9.6 展望	(255)
9.6.1 GPS 现代化	(255)
9.6.2 GPS III	(256)
第 10 章 GLONASS	(257)
§ 10.1 概述	(257)
10.1.1 历史回顾	(257)
10.1.2 项目阶段	(258)
10.1.3 管理和运营	(258)
§ 10.2 参考系统	(260)
10.2.1 坐标系统	(260)
10.2.2 时间系统	(261)
§ 10.3 GLONASS 服务	(261)
10.3.1 标准定位服务	(262)
10.3.2 精密定位服务	(262)
§ 10.4 GLONASS 系统结构	(263)
10.4.1 空间段	(263)
10.4.2 控制段	(265)
§ 10.5 信号结构	(267)

10.5.1	载波频率	(269)
10.5.2	伪随机码和调制	(270)
10.5.3	导航电文	(272)
§ 10.6	展望	(274)
第 11 章	Galileo 系统	(275)
§ 11.1	概述	(275)
11.1.1	历史回顾	(275)
11.1.2	项目阶段	(277)
11.1.3	管理与运作	(277)
§ 11.2	参考系统	(278)
11.2.1	坐标系统	(278)
11.2.2	时间系统	(278)
§ 11.3	Galileo 系统服务	(279)
11.3.1	公开服务	(280)
11.3.2	商业服务	(280)
11.3.3	生命安全服务	(280)
11.3.4	公共安全管理服务	(280)
11.3.5	搜索与救援服务	(281)
§ 11.4	Galileo 系统结构	(281)
11.4.1	空间段	(282)
11.4.2	地面段	(285)
11.4.3	完备性确定	(287)
§ 11.5	信号结构	(288)
11.5.1	载波频率	(289)
11.5.2	PRN 码和信号调制	(290)
11.5.3	导航电文	(295)
§ 11.6	展望	(298)
第 12 章	其他全球卫星导航系统	(299)
§ 12.1	全球系统	(299)
12.1.1	GPS、GLONASS 和 Galileo 的比较	(299)
12.1.2	北斗-2 系统	(303)
12.1.3	其他全球系统	(304)
§ 12.2	区域系统	(307)

12.2.1	北斗-1 系统	(307)
12.2.2	QZSS	(309)
12.2.3	其他区域系统	(312)
§ 12.3	差分系统	(313)
12.3.1	原理	(314)
12.3.2	差分改正域	(314)
12.3.3	差分系统实例	(315)
§ 12.4	增强系统	(317)
12.4.1	空基增强系统	(318)
12.4.2	地基增强系统	(322)
§ 12.5	辅助系统	(324)
§ 12.6	展望	(325)
第 13 章	GNSS 应用	(326)
§ 13.1	GNSS 观测量产品	(326)
13.1.1	卫星坐标	(326)
13.1.2	位置确定	(327)
13.1.3	速度确定	(333)
13.1.4	姿态确定	(333)
13.1.5	时间传递	(336)
13.1.6	其他产品	(336)
§ 13.2	数据传输和格式	(338)
13.2.1	RTCM 格式	(338)
13.2.2	RINEX 格式	(339)
13.2.3	NMEA 格式	(340)
§ 13.3	系统集成	(341)
13.3.1	GNSS 和 INS	(342)
13.3.2	无线电导航计划	(342)
§ 13.4	用户段	(342)
13.4.1	接收机特征	(342)
13.4.2	控制网	(345)
13.4.3	信息服务	(346)
§ 13.5	应用集锦	(347)
13.5.1	导航	(347)
13.5.2	测绘	(350)

13.5.3 科学应用	(351)
第 14 章 结论与展望	(352)
参考文献	(355)
缩略语	(389)
术语中英文对照	(399)