



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

“十一五”国家重点图书出版规划项目

GNSS反射信号处理 基础与实践

GNSS Reflected Signal Processing: Fundamentals and Applications

杨东凯 张其善 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

国家科学技术学术著作出版基金 资助出版
电子信息科技专著出版专项资金
“十一五”国家重点图书出版规划项目

数字中国丛书

GNSS 反射信号处理 基础与实践

GNSS Reflected Signal Processing:
Fundamentals and Applications

杨东凯 张其善 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书在介绍 GNSS（全球导航卫星系统）基本理论和应用的基础上，结合 GNSS 导航卫星直射信号接收处理技术，对 GNSS 反射信号的理论和方法进行了全面、系统、深入的阐述，其内容涉及 GNSS 反射信号的电磁波理论、反射信号接收处理方法、反射信号接收机的软硬件设计，以及 GNSS 反射信号在海面风场探测、有效波高测量、土壤湿度测量、移动目标探测和表面成像等方面的应用，并给出了 GNSS 反射信号针对海面测风、海面测高的应用模型和实际测试结果。

本书融入了作者多项国家级研究项目的成果，反映了国内外相关领域研究的最新进展，初步形成了较为完整的 GNSS 反射信号接收处理理论和方法体系。

读者对象：卫星导航相关领域（电子通信、航空航天、计算机等）的高校师生，以及从事通信、导航、气象遥感、海洋遥感及其应用研究的科技人员。

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

GNSS 反射信号处理基础与实践 / 杨东凯，张其善著. —北京：电子工业出版社，2012.5
（数字中国丛书）
ISBN 978-7-121-16752-2

I. ①G… II. ①杨… ②张… III. ①卫星导航—全球定位系统—信号处理 IV. ①TN967.1②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 070045 号

责任编辑：张来盛（zhangls@phei.com.cn） 特约编辑：王沈平
印 刷：涿州市京南印刷厂
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：787×1 092 1/16 印张：14.5 字数：370 千字
印 次：2012 年 5 月第 1 次印刷
印 数：3 000 册 定价：59.00 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 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

《数字中国丛书》编委会

名誉主编：徐冠华 许智宏 陈述彭

主 编：陈运泰 童庆禧

副主编：杨学山 刘燕华 李德仁 李小文 陈俊勇 迟惠生

方 裕 承继成 李 琦

编 委：（按拼音排序）

陈拂晓 陈 军 陈秀万 程承旗 承继成 崔伟宏

董宝青 方 裕 龚健雅 过静君 郝 力 何建邦

蒋兴伟 景贵飞 李 斌 李伯衡 李纪人 李 京

李 莉 李 琦 李增元 李志林 李志忠 廖小罕

林 晖 林宗坚 刘定生 刘纪远 刘燕华 闫国年

马蔼乃 潘 懋 秦其明 邵立勤 史文中 田国良

王 宏 王 桥 王钦敏 王瑞江 邬 伦 吴立新

吴信才 徐 枫 徐希孺 晏 磊 杨崇俊 杨学山

叶嘉安 岳天祥 曾 澜 查宗祥 郑立中 周成虎

邹 生

执行编委：（按拼音排序）

陈拂晓 陈秀万 程承旗 承继成 方 裕 李 琦

秦其明 邬 伦 晏 磊 曾 澜 郑立中

执行编委召集人：方 裕 承继成

总 序

毛泽东同志语重心长，寄重望于青年，他说，“世界是你们的”，“你们是早上八九点钟的太阳”。在进步节奏越来越快的信息社会，青年同志承受着巨大的压力，渴望插上知识的翅膀，需要凝聚智慧的力量，展翅腾飞，才能胜任历史重任，适应社会需求。他们需要通过键盘去解释这个多动的世界，需要用电脑去跟踪这个多变的世界，去了解过去，去改善现状，去打造未来。

近半个世纪以来，人们已经向太空发射了数以千计的遥感对地观测卫星、地球定位卫星、全球通信卫星。这些卫星夜以继日地运行在太空，监测着地球上资源、环境和生态的变化，监视着城市化和土地覆盖的更新。人们敷设了遍布各大洲的通信光缆，设置了进入千家万户的宽带互联网络，加速了电离层以内的信息流的流动。人们在平流层开发了超音速飞机，加速了洲际往来，还在不断地修建高速公路，提速火车，增加集装箱的制造和门对门的运输，加速物流配送的能力。于是，地球上的时空观念发生了很大的变化，以上海双休日旅游半径为例，在一小时之内可以到达杭州、宁波和南京；两小时之内，可以到达黄山、庐山和武夷山。来自千里之外的新疆的石油、天然气和来自长江三峡的电力，川流不息地供应到市区和郊区……这就是我们今天生活中面对的信息社会的现实，使我们不能不转变传统的时空观念。

这个数字的信息社会，还只是一个虚拟的、透明的世界。展望未来，“数字地球”还将进一步改变我们人类居住的这个星球的面貌。在我国也相应地提出了“数字中国”计划，各级政府正在推行“电子政务”改革管理模式，提高工作效率和服务水平，转变政府职能。计划到2008年，全国政府采购额将达76亿元人民币，实现80%城市的信息化。以北京为例，在城区已设计了万米网格的管理和监理新模式，加强社区的空间管理，从社区开始打破过去条块分割的局面。2008年北京市将设置2000个便民信息亭，扩大公共信息服务范围；公司和企业积极开展电子商务能力建设，力争与国际接轨，缩小数字鸿沟，提高商贸竞争能力，节约水土资源，降低能源消耗成本；工业基地努力推行“电子制造”，走信息化带动工业化的新路。例如，我国地图测绘、地震、地质、气象行业早已实现全数字化；东北老工业基地也在实现自动化设计与质量控制一体化的基础上，明显提高了产量、质量，逐步促进工业生产的良性循环，向循环经济发展；在科技教育部门，大力推广远程教育和远程医疗，在我国西部开发和成人职业教育方面，取得了相当显著的实效，受到了普遍的欢迎。

“数字中国”对国家经济规划与建设尤为重要。例如，粮食是否生产过剩，是否应该退耕还林、还草？煤炭生产是否过多？石油能源能否制约未来经济发展？是钢铁投资、汽车、房地产炒得过热，还是城市化过程太慢？水电、核电开发与火电比例是否失调？人口达到零增长是否导致老年化？西部开发战略，东北老工业基地改造与东部跨越式发展，带动中西部，孰先孰后，孰轻孰重？如何缩小地区差异、城乡差别？这些都是关系国家全面建设小康生活中的大问题，需要定性、定量地作出空间分析，为科学发展观提供科学的依据。

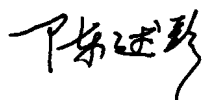
中国主张从我做起，2004年年底在北京大学成立了“数字中国研究院”；目前已有半数的省区开展“数字省区”建设；长江、黄河等五大河流启动“数字流域”工程；将近1/3，

约 200 个城市，广泛、深入地开展“数字城市”、“数字街区”和“数字社区”的试点。另外，在生态建设、功能区划、环境保护、文物保护等诸多方面，对协调城市与区域经济社会可持续发展，取得了可喜的进展。特别是近几年来，由于信息科学计算技术的迅速进步，IPv6 为网络计算提供大容量、快速的结点，第三代互联网的区域试点获得成功；空间信息的资源共享在技术上有了可靠的保障，公共的科学研究数据平台呼之欲出；空间分析模型与地学信息图谱也有所创新；汉字自动排版与专业制图软件开发有了重大突破；一个整合遥感、卫星定位系统、地理信息系统与互联网的全球技术系统，已脱颖而出，崭露头角，近 100 所大专院校为此设立了专科或本科，400 多家企业（法人）已注册，理论的梳理和人才的培养迫在眉睫。仅上海市就急需地理信息系统高级人才 6 万人。

从科学建设的角度着眼，无论是国家和社会的重大需求，还是人才培养、技术系统的开发、理论基础的研究，都需要一套能够反映当今国家数字化状况的丛书出版。北京大学的承继成、方裕教授等登高一呼，发起编写“数字中国丛书”，立刻得到了社会各界的积极响应，他们尽心尽力的奉献精神 and 协作攻关的团队精神，我是十分钦佩的。

丛书的形式能够为读者提供比较系统、全面的知识。早在清朝乾隆年间编辑的国家级《四库全书》举世瞩目，叹为观止；近代商务印书馆王云五主编的《大学丛书》、中华书局编印的中学生《万有文库》，对于我国近代人才的培养，发挥过巨大的历史作用，以这些丛书为范本，自学成才的名家大有人在。但上述丛书都是多学科性的，而《数字中国丛书》的编辑、出版则推陈出新，自成一体，它以数字技术为主体，以中国的信息化与现代化为研究范围，整合数字资源，集成信息系统，以科学理论指导应用实践，以技术系统支持科学研究。执笔者都是该领域工作在第一线的著名学者。该丛书不仅是为我国全面建设小康社会，加速信息化和现代化作出切实的贡献，同时也是为共建、共享“数字地球”作出示范。我衷心祝愿《数字中国丛书》为我国国民经济信息化建设起到一定的推动作用。

中国科学院院士
第三世界科学院院士
国际欧亚科学院院士



2006 年 5 月 9 日

序

全球导航卫星系统（GNSS）经历了 40 余年的发展，已经在国家的经济社会和人们的日常生活中发挥了越来越重要的作用，并逐渐成为国家空间信息基础设施的重要组成部分。随着我国北斗系统建设进程的加快，欧盟伽利略计划的实施，美国 GPS 和俄罗斯 GLONASS 现代化的推进，GNSS 的应用正日益改变我们的生活。可以说，GNSS 的应用已经远远超出了人们的想象。

在众多 GNSS 的应用领域中，GNSS-R 是自 20 世纪 90 年代初发展起来的一个分支。利用经反射后的导航卫星信号，对反射面的物理特性和参数进行反演，是典型的反问题。美国、欧盟在该领域的发展较为领先，都在低轨卫星上安装了 GNSS-R 接收机，并通过机载、陆地实验获得了海面风场、土壤湿度、海冰等大量观测数据，研究了相应的反演模型。GNSS-R 中的研究内容，如导航卫星信号的反射机理，信号能量、相位及频率随反射面物理特征变化的数学模型，反射信号接收处理算法，各类参数反演模型等，已成为 GNSS-R 领域的重要科学问题和备受国内外学者广泛关注的研究热点。

国内青年学者杨东凯教授在国家级突出贡献专家张其善教授的指导下，近年来在 GNSS-R 相关领域开展了大量深入、细致的研究工作。他们承担了国家 863 计划课题“GNSS 反射信号接收处理公共平台”，积极倡导并参与了北斗系统的海风海浪探测应用示范，成为国际上该领域十分活跃的研究团队。通过持续研究，已在反射信号精细跟踪、功率波形成、相关接收处理等方面取得了一系列独具创新性的研究成果。

两位教授所著的《GNSS 反射信号处理基础与实践》一书，在总结他们多年研究成果的基础上，参考了国内外相关领域的最新研究进展，对 GNSS-R 理论和方法进行了全面、系统、深入的阐述，其内容涉及 GNSS 反射信号的电磁波理论、反射信号接收处理方法、反射信号接收机的设计、海面风场探测、有效波高测量、土壤湿度测量等问题，初步形成了较为完整的 GNSS 反射信号接收处理的理论和方法体系，是我国学者在 GNSS-R 研究领域所作的重要贡献。书中所介绍的技术方法和研究成果对于推动我国北斗的应用，也具有重要的工程参考价值。

我衷心祝贺本书出版以及本书作者取得的成果，相信本书的问世对我国卫星导航事业的发展将会发挥重要作用。

中国工程院院士

刘经南

2011 年 10 月

前 言

利用全球导航卫星系统 (GNSS) 的反射信号进行反演是 GNSS 领域当前的研究热点之一。自 1993 年海外学者发现这一现象以来, 美国航空航天局和国家气象局、欧洲空间局和卫星气象中心, 澳大利亚、日本和中国的学者就一直对反射的导航卫星信号进行各个层次的研究, 其应用领域涉及海洋气象参数 (如海浪、海风、海水盐度、海冰等) 的反演, 土壤湿度、森林覆盖等参数的反演, 移动目标探测和地球表面成像等内容。对于该领域的研究, 大多集中在反射信号接收处理设备研制、信号处理算法研究、物理反演模型研究。其中, 美国和欧洲走在了该领域的前列, 并已经在陆地、航空和卫星三类载体上配备 GPS 反射信号接收机, 进行了大量的数据采集和处理实验, 初步获得了有效的海面风场反演模型。

我国对 GNSS-R 遥感探测技术的研究尚处于起步阶段, 第一篇文章于 2002 年在“海洋监测高技术论坛”上发表, 其后刊登在《高技术通讯》2003 年 3 月增刊上。此后, 在国家 863 计划 (2002AA639190) 的支持下, 著者带领研究小组在国内首次自主研发了 12 通道机载串行延迟映射接收机系统, 并于 2004 年 8 月成功完成机载试验。2006 年和 2007 年分别在国家 863 计划 2006AA09Z137 和 2007AA12Z340 的持续支持下, 研究小组随后在黄海、渤海、南海等海域进行了海岸地面实验与航空飞行试验, 取得了大量原始数据。2008 年在国家自然科学基金 (60742002) 的支持下, 研究小组对基于 GNSS 反射信号的移动目标探测进行了理论分析与初步的数据采集实验。针对海洋测风、海面测高、目标探测及土壤湿度等应用领域, 研究小组发表了一系列学术论文, 申请获批了多项国家发明专利。目前, GPS 反射信号接收机在中国气象局所属的海洋气象观测站进行实时观测, 数据处理正在同步进行之中, 已经取得了初步的业务数据分析结果。

中国科学院、总参气象水文总局以及国内多所高校对该领域也进行了深入的跟踪研究, 完成了实际的数据采集与分析处理实验, 取得了一些对进一步研究具有指导意义的学术成果。本书在国家科学技术学术著作出版基金的资助下, 总结了著者所承担的国家 863 计划课题和国家自然科学基金课题的研究成果, 从全球导航卫星系统的现状出发, 分析了 GNSS 反射信号的特性和接收处理的基本方法, 对反射信号接收机的设计从硬件和软件两个角度进行了详细的讨论, 针对海面测风、海面测高两个应用领域全面总结论述了 GNSS 反射信号的应用模型以及研究小组所取得的实际测试结果, 并对土壤湿度测量、移动目标探测和表面成像进行了初步的探索。

本书基于著者近年来对 GNSS 反射信号接收处理技术及应用研究所取得的成果撰写, 并力图反映近年来国内外的最新成果, 希望通过本书的出版, 让读者对该领域的研究现状有一个全面、系统的了解。本书由北京航空航天大学教授杨东凯博士主笔, 张其善教授审阅了全书, 研究小组成员张波博士、博士生李伟强、李明里、路勇、张益强、姚彦鑫和国

佳以及硕士生吴红甲、唐阳阳等参加了部分仿真分析和文字编辑工作。本书的出版得到了电子工业出版社的大力支持，张来盛编辑为书籍的出版付出了大量辛苦的劳动，在此表示由衷的感谢和敬意。同时，本书的出版还得到了北京航空航天大学院士张彦仲教授、李署坚高工，中国电子科技集团曹冲研究员、航天科技集团张孟阳研究员、中国科学院遥感技术与应用研究所李紫薇研究员、海军航空工程学院王红星教授、大连海事大学张淑芳教授、石家庄军械工程学院李小民教授以及中国气象局李黄副局长、夏青教授和曹云昌研究员的鼎力支持和帮助，在此一并表示感谢。

中国工程院院士、武汉大学原校长刘经南教授在百忙之中为本书作序，谨此表示衷心的感谢。

由于著者水平有限，书中难免存在错误或不足，敬请同仁批评指正。

著 者

2011年10月于北京

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 卫星导航系统概述	(1)
1.1.1 美国的全球定位系统	(1)
1.1.2 其他全球导航卫星系统	(3)
1.2 GNSS-R 技术	(7)
1.2.1 正问题与反问题	(7)
1.2.2 GNSS-R 技术的定义	(7)
1.2.3 GNSS-R 技术的特点和优势	(8)
1.3 GNSS-R 技术的发展	(9)
1.3.1 海面测风	(9)
1.3.2 海面测高	(10)
1.3.3 海冰探测	(11)
1.3.4 海洋盐度探测	(12)
1.3.5 土壤湿度探测	(12)
1.3.6 移动目标探测	(13)
1.4 本书结构	(14)
参考文献	(14)
第 2 章 GNSS 导航卫星信号概述	(22)
2.1 扩展频谱通信基本原理	(22)
2.2 GPS 系统的导航信号	(23)
2.2.1 频率与调制方式	(23)
2.2.2 GPS 卫星信号中的 C/A 码	(24)
2.2.3 GPS 卫星信号导航电文的结构	(28)
2.2.4 现代化后的 GPS 信号	(30)
2.3 其他卫星导航系统的导航信号	(32)
2.3.1 GLONASS 系统	(32)
2.3.2 Galileo 系统	(34)
2.4 小结	(35)
参考文献	(36)
第 3 章 GNSS 信号的接收与处理	(37)
3.1 接收信号数学模型	(37)

3.1.1	卫星信号的接收与数字化	(37)
3.1.2	相关运算	(39)
3.2	卫星信号的捕获	(42)
3.2.1	卫星信号捕获的基本原理	(42)
3.2.2	卫星信号的捕获方法	(45)
3.3	卫星信号的跟踪	(47)
3.3.1	GPS C/A 码相位跟踪	(48)
3.3.2	载波跟踪	(49)
3.4	导航数据解调与定位解算	(51)
3.4.1	数据同步的建立	(51)
3.4.2	定位原理与方法	(53)
3.5	新型导航信号的处理	(57)
3.5.1	新型导航信号的特点	(57)
3.5.2	BOC 信号及处理方法	(58)
3.5.3	复合信号及处理方法	(61)
3.6	小结	(62)
	参考文献	(62)
第 4 章	GNSS 反射信号特性	(65)
4.1	基本概念	(65)
4.1.1	电磁波	(65)
4.1.2	电磁波的极化	(66)
4.1.3	电磁波的反射	(68)
4.2	GNSS 反射信号基础	(74)
4.2.1	GNSS-R 几何关系描述	(74)
4.2.2	GNSS-R 反射系数	(75)
4.3	反射信号数学描述	(76)
4.3.1	直射信号数学描述	(76)
4.3.2	反射信号数学描述	(77)
4.4	小结	(79)
	参考文献	(79)
第 5 章	GNSS 反射信号的接收与处理	(81)
5.1	反射信号特性简介	(81)
5.2	反射信号的相关函数	(82)
5.2.1	时延一维相关函数	(83)
5.2.2	多普勒一维相关函数	(83)
5.2.3	时延-多普勒二维相关函数	(84)

5.3	反射信号相关值的计算方法	(85)
5.3.1	反射信号二维相关函数的离散形式	(85)
5.3.2	二维相关值的计算方式	(86)
5.3.3	二维相关值计算参考点的选取	(88)
5.3.4	二维相关值求解中本地信号的产生	(88)
5.3.5	二维相关值信噪比的提高方法	(90)
5.4	反射信号接收机通用模型与实现方式	(92)
5.4.1	通用模型	(92)
5.4.2	实现方式	(93)
5.5	小结	(95)
	参考文献	(95)
第6章	反射信号接收机的硬件实现	(98)
6.1	接收机总体架构及主要部件	(98)
6.1.1	接收机总体架构	(98)
6.1.2	接收机主要部件	(100)
6.2	多通道相关器	(104)
6.2.1	反射信号处理通道	(105)
6.2.2	DSP 数据交互控制接口	(110)
6.2.3	USB 控制接口	(111)
6.2.4	UART 控制接口	(112)
6.3	DSP 的信号处理	(113)
6.3.1	直射信号处理	(114)
6.3.2	反射信号处理	(116)
6.4	小结	(117)
	参考文献	(117)
第7章	反射信号接收机的软件实现	(119)
7.1	软件接收机工作原理	(119)
7.1.1	基本结构	(119)
7.1.2	数据传输接口	(120)
7.1.3	数据读取流程	(121)
7.2	信号处理	(121)
7.2.1	反射信号处理流程	(121)
7.2.2	反射信号相关功率计算	(122)
7.3	反射信号软件接收机的实现	(123)
7.3.1	软件功能	(123)
7.3.2	实现效率分析	(124)

7.3.3	实时性方案研究	(125)
7.4	小结	(126)
	参考文献	(126)
第 8 章	GNSS-R 测高应用	(127)
8.1	概述	(127)
8.2	基于 GNSS-R 的高度测量技术	(129)
8.2.1	高度测量原理	(129)
8.2.2	基于 C/A 码延迟的测高方法	(135)
8.2.3	基于 L1 载波相位延迟的测高方法	(139)
8.2.4	基于 L1 载波频率的测高方法	(140)
8.3	基于 GNSS-R 的有效波高测量技术	(142)
8.3.1	利用 DCF 测量有效波高	(143)
8.3.2	利用 ICF 测量有效波高	(144)
8.3.3	有效波高实验验证与结果分析	(146)
8.4	小结	(154)
	参考文献	(154)
第 9 章	GNSS-R 海面测风应用	(156)
9.1	海面统计特征	(156)
9.1.1	海浪谱的定义	(156)
9.1.2	统计特征描述	(157)
9.1.3	海面粗糙度准则	(157)
9.2	海洋遥感相关数学模型	(158)
9.2.1	海浪谱模型	(158)
9.2.2	电磁散射模型	(162)
9.2.3	散射信号相关功率模型	(164)
9.3	海面散射区域特性	(165)
9.3.1	天线覆盖区	(165)
9.3.2	等延迟区	(166)
9.3.3	等多普勒线	(170)
9.3.4	闪耀区	(173)
9.4	海面散射模型的数值仿真分析	(174)
9.4.1	时延-多普勒二维相关功率分析	(174)
9.4.2	时延-一维相关功率分析	(176)
9.4.3	多普勒-一维相关功率分析	(181)
9.5	风场反演	(183)
9.5.1	风场反演基本流程	(183)

9.5.2 风场反演算法	(184)
9.5.3 风场反演实例	(186)
9.6 小结	(194)
参考文献	(194)
第 10 章 GNSS-R 在其他领域中的应用	(196)
10.1 GNSS-R 土壤湿度反演	(196)
10.1.1 GNSS-R 土壤湿度探测原理	(197)
10.1.2 干涉图技术	(199)
10.1.3 土壤湿度反演结果	(200)
10.2 GNSS-R 目标探测技术	(201)
10.3 GNSS-R 表面成像技术	(203)
10.4 小结	(205)
参考文献	(205)
展望	(207)
附录 A 缩略语	(208)

第1章 绪 论

1.1 卫星导航系统概述

从 1958 年美国海军和霍普金斯大学为了给北极星核动力潜艇提供全球定位导航而合作开发海军导航卫星系统 (Navy Navigation Satellite System, NNSS) 以来, 卫星导航系统的研究和开发已经历了半个多世纪的发展。目前, 卫星导航已然成为各种导航方式中份量最重和最具研究价值的领域。随着人类社会的发展和科技进步, 其价值将会越来越清晰地展现在人们的眼前。与美国的全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 相对应的是苏联建立的 GLONASS (Global Orbiting Navigational Satellite System) 系统。此外, 欧盟和欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 正加紧实施建设自己的民用导航系统的计划——Galileo 计划; 而日本和印度等国也纷纷抛出自己的卫星导航系统研制计划, 并将建设相应的区域增强系统。在这样的全球大背景下, 我国也分别于 2000 年 10 月、12 月和 2003 年 5 月发射升空了自行研制开发的“北斗一号”定位导航系统的 3 颗地球同步轨道卫星, 翻开了我国在该领域研究的新篇章, 当前正在积极进行更加现代化的“北斗二号”系统的各项设备开发与测试工作。

1.1.1 美国的全球定位系统

1957 年 10 月, 苏联发射成功世界上第一颗人造卫星。这颗卫星入轨运行后不久, 美国霍普金斯大学应用物理实验室在地面已知坐标点上捕获跟踪到了卫星发送的无线信号, 并解算出了卫星的轨道参数。依据这项试验成果, 该实验室的 F. T. Meclure 等设想了一个反向观测方案: 若已知在轨卫星的轨道参数, 地面上的观察者又测得该卫星信号的多普勒频移, 则可计算出观察者的位置坐标。这一设想成为了第一代卫星导航系统的基本工作原理。1958 年年底, 美国海军武器试验室委托霍普金斯大学的该实验室研究为美国军用舰艇导航服务的卫星系统, 即海军导航卫星系统。在这一系统中, 由于卫星的轨道都通过地极, 所以又称之为子午仪卫星导航系统。1964 年该系统交付海军使用, 1967 年 7 月美国政府宣布解密子午卫星的部分导航电文, 供民间应用。子午仪卫星导航系统由 6 颗卫星组成, 卫星轨道近似圆形, 轨道倾角约为 90° , 高度为 1 100 km, 周期为 107 min。

作为第一代卫星导航系统, 子午仪卫星导航系统虽然具有划时代的意义, 但其仍然存在着明显的缺陷, 主要表现为: 卫星少, 实时覆盖率低, 每隔 1~2 h 才有一次卫星进入视场; 卫星轨道低, 不易精密定轨; 卫星信号频率低, 难以补偿电离层影响, 等等。同时, 子午仪卫星导航系统无法实现全天候、全球性和高精度连续导航定位。为此, 美国于 20

世纪 60 年代末着手研制新的卫星导航系统。到 1972 年，海军武器试验室进行了名为 Timation 的星载高稳定时钟试验，能够提供二维定位、测距的能力。与此同时，空军也在进行名为 621B 的卫星定位系统的概念研究。为了协调各部门对导航的需求，研究发展新一代的卫星导航系统，1973 年美国国防部专门成立了一个联合办公室（Joint Program Office, JPO），在综合分析了当时卫星导航技术和概念的基础上，提出了一种新的卫星导航系统：授时与测距导航系统/全球定位系统（Navigation System Timing and Ranging/Global Positioning System, NAVSTAR/GPS），通常称之为 GPS（全球定位系统）。GPS 自 20 世纪 70 年代开始建设，历时 20 年，耗资 200 亿美元，于 1994 年全面建成并提供服务。该系统主要由三大部分组成，即空间卫星星座、地面监控系统和用户设备。

GPS 的空间卫星星座由 24 颗卫星组成，分布在 6 个轨道面上，每个轨道面上有 4 颗卫星；卫星轨道面相对地球赤道面的倾角约为 55° ，相邻轨道面的升交点赤经相差为 60° ；在相邻轨道上，卫星的升交点角距相差为 30° ；轨道平面距地面的高度约为 20 200 km，卫星运行周期为 11 h 58 min。卫星采用码分多址技术在 L1 和 L2 两个频率上广播测距码和导航数据。L1 和 L2 的中心频率分别为 1 575.42 MHz 和 1 227.60 MHz，L1 上调制有 P 码、C/A 码及导航电文数据，L2 上仅调制了 P 码和导航电文数据。

GPS 的地面监控系统包括 1 个主控站、3 个注入站和 5 个监控站。监控站是一种无人值守的数据采集中心，受主控站的控制，定时将卫星观测数据送往主控站。主控站的主要功能是：根据所收集的观测数据及时地更新导航电文，协调整个地面监控系统的工作，根据所测得的卫星轨道参数调整卫星轨道，进行卫星调度等。注入站的任务主要是在主控站的控制下，将主控站提供的卫星导航电文参数及控制指令用 S 波段数据通信上行链路发送到相应卫星，并监测注入信息的正确性。

GPS 卫星发射的无线电信号包括两种精度不同的测距码（P 码和 C/A 码），对应于两种不同的测距精度，即 GPS 提供了两种不同的定位服务，精密定位服务（Precise Positioning Service, PPS）和标准定位服务（Standard Positioning Service, SPS）。PPS 的主要对象是美国军事部门和其他特许部门，其规定的水平定位精度为 22 m（95%），垂直定位精度为 27.7 m（95%）；SPS 的主要对象是广大民间用户。美国政府为了保护所谓的国家利益，从 1997 年 7 月 1 日起，全部在轨卫星均实施旨在降低民用定位精度的 SA（Selective Availability）技术，使得民用级的 SPS 水平定位精度降为 100 m（95%），垂直定位精度降为 157 m（95%）。同时，为了防止敌方欺骗和干扰 PPS 服务，美国政府采用反欺骗（Anti-Spoof, AS）政策，在特定时期通过加密手段将 P 码变为 Y 码。出于国际卫星导航系统竞争的需要，美国宣布自 2000 年 5 月 1 日起取消 SA 政策，SPS 的定位精度比 SA 实施前提高了 5~10 倍。

GPS 的定位精度与其误差源有直接的关系，而误差源主要包括星历误差、卫星时钟误差、电离层和对流层误差、多径效应引起的误差和接收机测量误差等。为了进一步提高定位精度，满足大地测量等方面的应用要求，出现了差分 GPS（Differential GPS, DGPS）技术，而 SA 政策的实施从一个侧面也刺激了差分技术的发展。由于有些伪距测量误差与空间相关，在利用基本局域差分 GPS 技术时，离基准站较远的用户定位解不如近处用户的定

位解精确，而这种精度损失可以采用更先进的广域差分 GPS 技术来改善。基于广域差分技术的各种外部增强系统，目前得到各国普遍的重视，如美国的广域增强系统（Wide Area Augmentation System, WAAS），日本的 MSAS（Multi-functional Satellite Augmentation System）卫星增强系统。另外，由欧洲联盟委员会、欧洲空间局和欧洲航空导航安全组织联合组成的三联集团，建立了一个类似美国 WAAS 系统的 EGNOS（European Geostationary Navigation Overlay System）增强系统。

1996 年美国以总统决策指示的名义颁布了其 GPS 政策，建立了跨部门 GPS 执行理事会（Interagency GPS Executive Board, IGEB），管理 GPS 及其增强系统。1997 年 IGEB 把新的民用和军用要求一起写入修改后的 2000 版 GPS 运行需求文件，奠定了 GPS 现代化的基础。1998 年美国副总统戈尔宣布将使用 L2 频率播发第二种民用 GPS 信号，该信号被称为 L2C。2005 年 9 月发射升空的第一颗 IIR-M 卫星（PRN 17）已于 2005 年 12 月开始播发 L2C 信号，至 2016 年可有 24 颗卫星提供该信号。第三种民用信号 L5 至 2018 年可有 24 颗卫星播发；第四种民用信号 L1C 将在 GPSIII 计划内实现；第一颗 BLOCKIII 卫星将于 2014 年发射，2021 年将达到 24 颗额定工作卫星数量。

美国的 GPS 目前由 31 颗在轨运行卫星以及在全球布建的 16 个地面测控站、2 个主控站和 12 个地面天线构成，是一个覆盖全球、军民两用、免收民用终端直接用户费的卫星定位系统，也是截至目前唯一能长期稳定运营工作的全球系统。目前，健康工作的卫星为：11 颗 Block IIA，12 颗 Block IIR，7 颗 Block IIR-M，1 颗 Block IIF，3 颗 Block IIA 卫星作为在轨备份。

1.1.2 其他全球导航卫星系统

随着电子技术的不断发展，GPS 设备的成本不断下降，GPS 在民用市场上的应用领域不断持续扩大，带来了巨大的经济效益。出于战略目的、军事安全和商业利益，一些国家和地区也开始着手建立自己的全球导航卫星系统，包括苏联组织建设的 GLONASS 系统，欧盟的 Galileo 系统，以及我国自主建设的北斗系统等。同时，印度空间研究组织（India Space Research Organization, ISRO）正在开发卫星导航定位系统，并将与 GPS、GLONASS 和 Galileo 系统相连接。日本则计划投入 2 000 亿日元，建成由 3 颗卫星组成的准天顶卫星系统（Quasi-Zenith Satellite System, QZSS）。

1. GLONASS 系统

苏联海军于 1965 年开始建立了一个卫星导航系统，称之为 CICADA，它的基本原理和美国的子午仪导航系统类似，也是基于测量多普勒频移原理的第一代卫星导航系统。该系统由 12 颗所谓宇宙卫星组成其卫星星座，轨道高度为 1 000 km，运行周期为 105 min，每颗卫星发送频率为 150 MHz 和 400 MHz 的导航信号。20 世纪 80 年代苏联开始了第二代卫星导航系统——GLONASS 星基无线电导航系统计划，它在全世界范围内提供三维定位、测速和授时服务。GLONASS 在许多方面非常类似 GPS，位置、速度、时间（PVT）的确定