

航天科技图书出版基金

资助出版

国家863计划课题(2007AA12Z308)

卫星导航系统 分析与仿真技术

文援兰 等 编著



中国宇航出版社

序

随着航天技术、通信技术、计算机技术的迅猛发展,卫星导航系统的发展也日新月异。卫星导航系统能够提供全球、全天候、高精度、快速响应的连续导航定位和授时服务,在精度、地域、时域、实时性方面对导航领域的发展产生了革命性的影响,目前已基本取代无线电导航、天文测量、传统大地测量技术,成为人类活动中普遍采用的导航定位技术。作为国家重要的信息基础和战略设施,卫星导航系统已成为国家综合国力的重要标志,产生了巨大的经济和社会效益。以美国的 GPS 系统为例,据统计,仅 2006 年,全球由此获得的直接和间接经济效益已达上万亿美元规模。卫星导航系统也因此被称为是继通信、互联网之后信息产业的第三个新的经济增长点。

无论在经济还是军事上,卫星导航系统的建设已经成为重要的战略问题。为此,许多航天大国都在积极推进卫星导航系统的发展,如美国的 GPS 系统、俄罗斯的 GLONASS 系统以及欧盟正在建设的伽利略系统。中国作为发展中国家,拥有广阔的领土和海域,一直高度重视卫星导航系统的建设,努力探索和发展拥有自主知识产权的卫星导航系统。2003 年 12 月,中国自行设计研发的北斗 1 代卫星导航系统建成并正式开通运行,具备在中国及其周边地区范围内的定位、授时、报文等功能,并已在测绘、电信、水利、交通运输、渔业、勘探和国家安全等诸多领域发挥了重要作用。2007 年 4 月 14 日,我国成功发射北斗 2 代卫星导航系统的第一颗星,标志着我国卫星导航系统进入新的发展建设阶段,预计新一代卫星导航系统将在 2020 年全部建成。

卫星导航系统的建设包括空间卫星、地面监测网和用户接收机三大部分,各部分之间及其内部接口关系异常复杂,涉及多个学科专业知识领域,是一项规模庞大、结构复杂的系统工程。如何准确预测和

把握卫星导航系统在全寿命周期的运行行为、功能和性能,从而支持卫星导航系统的定义、集成、验证、确认和使用分析,是卫星导航系统建设过程中必须解决的关键问题。过去,由于各种条件特别是计算机技术的限制,导航系统分析工作难以展开。以 GPS 的建设为例,其概念早在 20 世纪 70 年代提出,但由于主要分析和验证工作均依靠卫星在轨演示验证完成,导致系统建设周期长达 20 多年,且费用高昂。

随着信息技术的发展,可以充分利用现代计算机仿真技术和试验技术,建立较真实的反映卫星导航系统工作原理及运行机制的系统模型,集成相关领域的计算模型,产生和复现卫星导航系统行为、功能和性能,从而支持卫星导航系统的发展论证与分析工作、支持系统工程建设期间的调试、支持系统全寿命周期运行状况的仿真、支持系统性能评估等。目前,国内外 GPS 相关的分析试验大部分已基于计算机技术完成,大大提高了导航系统的设计与使用效率。

《卫星导航系统分析与仿真技术》一书是作者多年从事卫星导航系统仿真科研与教学工作的系统总结,反映了当前卫星导航领域的最新成果和理论。本书侧重于卫星导航系统星座与性能分析、监测站数据处理与分析、主控站数据处理与分析、用户定位与导航方法精度分析、卫星导航系统的性能评估、卫星导航系统仿真平台设计及其关键技术等方面的研究。作者把重点放在卫星导航系统的数学建模和数据处理的理论和方法上,注重内容的系统性、独立性和创新性,突出工程实践与理论发展相结合,是一本有着重要价值的学术著作。我衷心地希望,在我国新一代导航系统建设的宏伟大业中,本书的出版对于我国卫星导航系统的研制和卫星导航事业的发展能起到积极的促进作用。

张育林

2009 年 5 月

前 言

20 世纪 50 年代末,随着人造卫星的上天以及人造卫星技术的发展和应⽤,卫星导航系统应运而生。导航卫星发射无线电导航信号为地面、海洋和空中⽤户提供全天候、全天时、高精度的导航定位。卫星导航系统由空间卫星星座、地面监测网和⽤户接收机等三大部分组成,它们之间及其内部接⼝关系异常复杂,涉⼜多学科专业领域知识,是一项规模庞大、结构复杂的系统工程。随着计算机技术的发展,可以利用计算机仿真技术,开发卫星导航数学仿真和半实物仿真系统,仿真卫星导航系统的功能,支持系统设计,进行系统工程建设期间的调试,支持完成系统的性能评估。本书是为了提高我国卫星导航技术水平、支持我国卫星导航系统的建设、促进我国卫星导航事业的发展而写作的。本书主要研究内容如下:

(1) 卫星导航系统所处的时空环境。建立时间系统模型、坐标系统模型及其各种时间系统、坐标系统之间的转换模型。

(2) 卫星导航系统星座性能。研究导航卫星星座的设计,进行导航卫星受力分析,建立轨道摄动力模型和卫星轨道计算模型。

(3) 监测站数据处理及性能分析,包括监测站建模,分析地面监测站的布设;监测接收机监测数据(伪距、伪距变化率、载波相位和激光测卫)的建模和预处理;星地时钟比对和站间时间同步的建模和分析。

(4) 主控站数据处理技术。包括导航卫星轨道确定、预报的建模和精度评估,建立广播星历参数、卫星钟差参数、电离层延迟改正参数、电离层网格垂直延迟改正参数、系统完好性信息的拟合模型。

(5) ⽤户导航定位和精度评估,包括静态的或动态的单点定位、相对定位和差分定位。

(6) 卫星导航系统仿真平台,包括平台的构成和仿真关键技术

研究。

(7) 结合仿真实例,研究卫星导航系统仿真结果分析与评价技术。

本书适用于卫星导航专业和仿真专业及相关专业的研究人员、工程技术人员、高等院校教师和研究生。

在本书的编著过程中,我们参阅和部分引用了国内外许多专家学者的论文和书籍,在此对原作者表示衷心的感谢;潘旺华博士、杨雪榕博士、刘光明博士、尹大伟博士、李猛博士、朱利伟硕士、张绍勇硕士、刘峰硕士、刘翔春硕士等参加了本书部分内容的编写及校对工作;该书还得到了卫星定位总站刘志俭博士的热情帮助,在此表示衷心的感谢!感谢中国宇航出版社,特别是艾小军和马航编辑,为本书的出版付出的辛勤劳动!本书所涉及的研究得到了国家高技术研究发展计划(863计划:2007AA12Z308)经费支持,得到航天科技图书出版基金的资助,在此表示衷心的感谢。

由于水平所限,对某些问题的理解尚不是十分透彻,书中定有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2008年4月于国防科技大学

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登陆中国宇航出版社网站,点击"出版基金"专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010)68767205, 68768904

目 录

第 1 章 卫星导航系统概述	(1)
1.1 卫星导航系统的基本原理及仿真需求	(2)
1.1.1 卫星导航系统的基本概念	(2)
1.1.2 卫星导航系统的基本组成	(3)
1.1.3 卫星导航定位的基本原理	(6)
1.2 GPS 全球卫星导航系统	(9)
1.2.1 GPS 系统的建立	(9)
1.2.2 GPS 系统的组成	(10)
1.2.3 GPS 系统的特点	(15)
1.3 GLONASS 卫星导航系统	(17)
1.3.1 GLONASS 系统的组成	(17)
1.3.2 GLONASS 系统的特点	(23)
1.4 伽利略卫星导航系统	(24)
1.4.1 伽利略系统的组成	(26)
1.4.2 伽利略系统的特点	(30)
1.4.3 伽利略飞行试验星	(32)
1.5 北斗卫星导航系统	(34)
1.5.1 北斗 1 代系统简介	(35)
1.5.2 北斗 1 代系统的工作原理及过程	(39)
1.5.3 北斗 1 代系统的定位原理	(40)
1.5.4 北斗 1 代系统的特点	(42)
1.5.5 北斗 2 代系统计划	(44)
参考文献	(46)

第2章 卫星导航系统的时间和坐标系统	(49)
2.1 时间系统	(49)
2.1.1 时间系统的定义	(49)
2.1.2 时间系统之间的转换关系	(54)
2.2 坐标系统	(61)
2.2.1 坐标系统的定义	(61)
2.2.2 坐标系之间的转换关系	(69)
参考文献	(76)
 第3章 卫星导航系统星座与性能分析	(77)
3.1 导航星座性能指标	(78)
3.2 导航卫星受力分析	(81)
3.2.1 地球引力	(82)
3.2.2 第三体引力摄动	(86)
3.2.3 相对论摄动	(87)
3.2.4 太阳辐射压力	(88)
3.2.5 地球反照和红外辐射压力	(91)
3.2.6 大气阻力摄动	(93)
3.2.7 其他摄动力	(95)
3.3 卫星加速度偏导数	(95)
3.3.1 地球引力加速偏导数	(95)
3.3.2 第三体引力摄动偏导数	(100)
3.3.3 相对论摄动偏导数	(101)
3.3.4 太阳辐射压力偏导数	(101)
3.3.5 地球反照和红外辐射压力偏导数	(103)
3.4 卫星轨道计算及摄动力对卫星轨道计算的影响	(103)
3.4.1 卫星轨道计算	(104)
3.4.2 摄动力模型对 GEO 卫星位置计算的影响	(105)
3.4.3 摄动力模型对 IGSO 卫星位置计算的影响	(107)
3.4.4 摄动力模型对 MEO 卫星位置计算的影响	(110)
3.5 摄动力量级的估计及摄动力的取舍	(113)

3.5.1	GEO 卫星和 IGSO 卫星摄动力取舍	(113)
3.5.2	MEO 卫星摄动力取舍	(114)
3.6	导航电文的结构与发播	(115)
3.6.1	GPS 导航电文结构	(115)
3.6.2	GLONASS 导航电文结构	(120)
	参考文献	(127)
第 4 章	监测站数据处理与性能分析	(129)
4.1	监测站的布设研究	(129)
4.1.1	测站可见性分析	(129)
4.1.2	测站几何和定轨精度	(133)
4.1.3	测站位置对法矩阵的影响	(144)
4.1.4	导航卫星监测站布设研究	(145)
4.1.5	测控网结点选址条件	(151)
4.2	地球固体潮模型和板块运动模型	(151)
4.2.1	固体潮对监测站坐标的影响	(152)
4.2.2	海洋负荷造成的监测站位移	(153)
4.2.3	潮汐造成的监测站坐标修正	(154)
4.2.4	板块运动的影响	(154)
4.3	地面气象参数模型	(156)
4.3.1	全球参考大气模式	(156)
4.3.2	我国的局部大气模式	(158)
4.4	观测数据的模型	(159)
4.5	观测数据的预处理	(161)
4.5.1	对流层传播延迟模型	(162)
4.5.2	相对论效应	(166)
4.5.3	多路径效应	(170)
4.5.4	天线相位中心改正	(174)
4.5.5	地球旋转效应	(176)
4.6	监测站数据处理	(177)
4.6.1	基本观测模型	(177)

4.6.2	相位平滑伪距和电离层延迟计算	(178)
4.6.3	利用电离层延迟率检测和修复相位周跳	(180)
4.6.4	利用双频 P 码/载波组合确定模糊度	(182)
4.7	站间时间同步	(185)
4.7.1	卫星双向时间频率传递	(185)
4.7.2	卫星共视法	(187)
4.7.3	卫星双向共视法	(188)
4.8	星地时钟比对	(190)
4.8.1	星地无线电双向测距法	(190)
4.8.2	无线电单向测距法	(192)
4.8.3	倒定位时间比对法	(192)
	参考文献	(194)
第 5 章 主控站数据处理与性能分析		(197)
5.1	确定导航卫星轨道	(197)
5.1.1	卫星运动方程	(197)
5.1.2	最小二乘法批处理确定卫星轨道	(202)
5.1.3	抗差批处理确定卫星轨道	(203)
5.1.4	卡尔曼滤波定轨	(206)
5.1.5	M-LS 抗差滤波定轨	(210)
5.1.6	卫星激光测距(SLT)观测模型	(212)
5.1.7	伪距和载波相位观测模型	(216)
5.2	卫星钟差拟合	(223)
5.2.1	监测站钟差参数计算	(223)
5.2.2	卫星钟差参数计算	(224)
5.3	电离层延迟模型参数拟合	(225)
5.3.1	穿透点坐标及垂直电离层延迟计算	(228)
5.3.2	改进的 Klobuchar 模型及其参数拟合	(230)
5.3.3	电离层网格垂直延迟模型	(234)
5.3.4	由球谐函数拟合电离层的电子含量	(235)
5.3.5	双频测量组合消除电离层影响	(239)

5.4 导航卫星广播星历拟合与分析	(240)
5.4.1 GPS 广播星历	(240)
5.4.2 GLONASS 广播星历	(244)
5.4.3 全球卫星导航系统广播星历拟合	(248)
5.4.4 切比雪夫多项式拟合卫星星历	(254)
5.4.5 广播星历拟合精度	(256)
5.5 卫星等效钟差计算	(265)
5.6 完好性分析	(268)
5.6.1 RURA 算法及分析	(268)
5.6.2 UDRE 算法及分析	(271)
5.6.3 GIVE 处理及 DIVE 内插计算分析	(273)
参考文献	(277)
 第 6 章 用户定位、导航方法与精度分析	 (282)
6.1 伪距测量定位	(282)
6.2 伪距测量定位的主要误差	(283)
6.3 静态用户导航定位和精度评估	(286)
6.3.1 伪距单点绝对定位解算	(286)
6.3.2 伪距静态定位解算	(288)
6.3.3 伪距相对定位解算	(289)
6.3.4 伪距定位精度估算	(293)
6.4 动态用户导航定位	(294)
6.5 应用抗差卡尔曼滤波进行动态定位	(297)
6.6 载波相位定位	(300)
6.6.1 载波相位测量定位原理	(301)
6.6.2 载波相位测量绝对定位技术	(305)
6.6.3 载波相位测量相对定位技术	(306)
6.7 差分定位	(307)
6.7.1 位置差分	(307)
6.7.2 伪距差分	(308)
6.7.3 广域差分	(309)

6.7.4 载波相位差分	(310)
6.8 卫星导航系统在航天器自主导航中的应用	(312)
6.8.1 几何法定轨	(313)
6.8.2 动力法定轨	(314)
6.8.3 计算与分析	(315)
参考文献	(319)
第7章 分布式仿真及其在卫星导航系统上的应用概述	(321)
7.1 分布式仿真	(321)
7.1.1 分布式系统	(322)
7.1.2 并行仿真与分布式仿真	(323)
7.1.3 仿真分布式的方法及应用	(324)
7.2 先进分布式仿真技术	(326)
7.2.1 先进分布式仿真技术的产生及发展	(327)
7.2.2 先进分布式仿真的核心技术	(337)
7.2.3 先进分布式仿真技术应用	(339)
7.3 卫星导航系统分布式仿真	(340)
7.3.1 卫星导航系统的仿真需求	(341)
7.3.2 卫星导航系统特征	(343)
7.3.3 卫星导航系统分布式仿真平台的技术难点	(345)
7.3.4 卫星导航系统仿真技术的现状与发展趋势	(348)
参考文献	(351)
第8章 基于高层体系结构的仿真技术分析	(353)
8.1 HLA 的基本内容	(353)
8.1.1 框架和规则	(354)
8.1.2 成员接口规范	(355)
8.1.3 对象模型模板	(361)
8.2 基于 HLA 的仿真设计开发	(364)
8.2.1 系统开发需考虑的几个问题	(364)
8.2.2 系统开发原则	(365)

8.2.3 系统功能要求	(367)
8.2.4 面向对象建模过程	(368)
8.3 HLA 与分布式对象体系结构的对比分析	(369)
参考文献	(374)
第 9 章 卫星导航系统仿真平台设计	(375)
9.1 平台总体设计	(376)
9.2 平台仿真应用功能设计	(382)
9.2.1 空间卫星星座仿真分系统	(382)
9.2.2 监测注入站仿真分系统	(384)
9.2.3 主控站仿真分系统	(387)
9.2.4 用户仿真分系统	(388)
9.3 平台仿真支撑环境功能设计	(392)
9.3.1 仿真支撑环境分系统	(392)
9.3.2 仿真性能评估分系统	(396)
9.3.3 仿真数据可视化分系统	(399)
9.3.4 仿真数据管理分系统	(402)
参考文献	(409)
第 10 章 基于 HLA 的卫星导航系统仿真关键技术	(410)
10.1 仿真系统对象类设计	(410)
10.2 仿真系统时间管理设计	(414)
10.2.1 HLA 的时间管理	(414)
10.2.2 仿真系统联邦的时间同步设计	(415)
10.3 仿真系统数据分发管理设计	(421)
10.3.1 HLA 的数据分发管理	(421)
10.3.2 仿真系统联邦的数据分发管理设计	(423)
10.4 仿真系统联邦成员的程序框架	(425)
10.5 仿真系统的校核、验证与确认技术	(426)
10.5.1 仿真的精度和可信度问题	(426)
10.5.2 VV&A 技术	(428)

10.5.3 卫星导航系统仿真的 VV&A	(430)
参考文献	(432)
第 11 章 卫星导航系统仿真开发实例	(433)
11.1 “卫星导航数学仿真系统”主要功能软件	(433)
11.1.1 中心控制台软件	(433)
11.1.2 卫星仿真程序	(439)
11.1.3 主控站仿真程序	(441)
11.1.4 监控站仿真程序	(442)
11.2 “卫星导航数学仿真系统”仿真评估	(444)
11.2.1 广播星历精度评估	(445)
11.2.2 卫星钟差精度评估	(446)
11.2.3 电离层模型参数精度评估	(448)
11.2.4 电离层网格垂直延迟参数精度评估	(449)
11.2.5 导航完好性参数评估	(451)
11.2.6 定位精度评估	(459)
参考文献	(462)

第 1 章 卫星导航系统概述

导航 (Navigation), 是指实时地测定导航系统 (或仪器) 载体在行进途中的位置和速度, 引导其到达目的地的技术或方法。20 世纪之前, 导航技术为适应航海的需求在实践中逐步发展起来, 其主要手段是采用罗盘领航和天文导航技术 (Celestial Navigation), 此后逐渐被陆地车辆和航空飞行器所利用。在无线电通信技术发明之后, 无线电导航台成为舰船和飞机等载体 “定位” 和 “定向” 测量的基准点, 因而陆基无线电导航系统 (Ground - based Radionavigation System, GRS) 得到了迅速发展, 典型的如仪表着陆系统 (Instrument Landing System, ILS)、微波着陆系统 (Microwave Landing System, MLS)、伏尔/测距器 (Very high frequency Omnidirectional Range/ Distance Measuring Equipment, VOR/DME)、罗兰 C (Loran C)、欧米茄 (Omega)、塔康 (TACTical Air Navigation, TACAN) 和台卡 (Decca) 系统等。高精度的陆基导航系统通常工作在高频频段, 但其作用距离受视距 (Line Of Sight, LOS) 的限制, 如伏尔的典型作用距离仅为 370 km, 方位信息准确度优于 $\pm 2.0^\circ$; 低频远程无线电导航系统精度相对较低, 欧米茄是一种甚低频超远程无线电导航系统, 可以为全球绝大部分区域的用户提供全天候的定位和导航服务, 其白天定位精度为 1.85~3.70 km, 夜间为 3.70~7.40 km^[1]。随着当代航海、航空及陆地等领域对导航定位精度需求的提高, 这些陆基无线电导航技术已经难以胜任, 主要表现在信号覆盖区域有限、技术落后、设备陈旧、精度太低等方面。20 世纪 50 年代末人造卫星的上天以及随后人造卫星技术的发展和应用, 为天基无线电导航系统 (Spaced - based Radionavigation System, SRS) 的产生和发展奠定了基础。早期的天基导航系统,

如 20 世纪 60 年代美国建立的海军导航卫星系统 (the U. S. Navy Navigation Satellite System, NNSS), 亦称子午仪 (Transit) 系统, 和 70 年代, 苏联建立的 Cicada 系统都能够提供高精度的二维定位服务, 实现了超远距离和高精度的统一, 开创了无线电导航定位的新时代。然而, 它们却存在明显的不足: 由于覆盖上存在时间间隙, 因而用户得不到连续定位, 而且由于采用单星、低频多点测量多普勒频移的测速体制, 每次定位时间较长, 定位频度还跟用户的纬度相关: 如在赤道附近子午仪用户平均每 110 min 可获得一次定位服务, 而在 80° 高纬度地区的定位频度上升到每 30 min 一次; 且每次用户接收机解算用户位置还需大约 10~15 min 的时间^[2]。这些缺点限制了它们仅适合低速运动的用户而不适合高动态用户 (如飞机、导弹)^[3]。为了突破子午卫星导航系统的应用局限性, 实现全天候、全球性和高精度的连续实时导航与定位, 第二代卫星导航系统——全球卫星导航定位系统 (Global Positioning System, GPS) 应运而生。卫星导航定位技术也随之发展到了一个辉煌的历史阶段, 并且展现了极其广阔的应用前景。

1.1 卫星导航系统的基本原理及仿真需求

1.1.1 卫星导航系统的基本概念

卫星导航系统 (卫星导航定位系统) 是由多颗导航卫星构成的导航星座、地面监测网和用户导航定位设备 (简称用户机) 等三部分所组成。卫星导航系统的基本原理是在已知卫星每一时刻的位置和速度的基础上, 以卫星为空间基准点, 装有接收机的导航用户 (包括地面、海洋、空中以及空间用户) 通过接收导航卫星发送高精度无线电导航信号、测定至卫星的距离或多普勒频移等观测量来确定用户的位置、速度。

卫星导航系统的导航定位方法主要分为多普勒测速导航定位和

时间测距导航定位两种。多普勒测速导航定位法是指用户接收机接收卫星发送的信号,测定卫星相对其运动的多普勒频率,并利用已知的卫星位置(或轨道参数)算出用户位置的技术方法。这种方法的优点是利用单颗卫星就可实施定位,因而系统组网所需的卫星数量较少;缺点是一次定位所需的时间较长,一般不能连续导航定位。早期的卫星导航系统,例如美国的子午仪系统就采用这种方法。

第二代卫星导航系统采用被动式双频伪随机测距导航体制,其基本原理就是根据时间测距进行导航定位。每颗导航卫星都装有高稳定度原子钟,可以为卫星导航信号提供精确计时信息。因为导航星连续发射 L 波段双频伪随机噪声导航信号,因此,如果用户接收设备也装有同卫星时钟严格同步的精确时钟,则可确定该设备接收卫星信号时的精确时间,从而测出导航信号从卫星到用户的传播时间,再乘上电波传播速度,就可计算出卫星发射机到用户接收机之间的距离。要是能同时接收 3 颗最佳几何图形的卫星发射的导航信号,就能分别求出到这 3 颗卫星的距离。因为导航信号中包括卫星星历表、时钟校正参数、传播延迟参数以及其他信息,所以,可以求出卫星发射导航信号时的精确位置。如果分别以每颗卫星为圆心,以卫星到用户的距离为半径作圆球,就可获得 3 个球体,其交点正是用户所在的位置。应该指出,用 3 颗星定位有一个不利之处,就是用户必须装备精确而昂贵的原子钟。如果用户能同时接收 4 颗卫星发射的导航信号,就不必装备精确的原子钟,也能精确地定出用户位置,同时还可给出用户不精确时钟的偏差。这种方法的优点是可以实时、连续地导航定位,精度高。其不足之处是所需组网的卫星数目较多。目前的卫星导航系统,如美国的 GPS 系统、俄罗斯的 GLONASS (GLObal Navigation Satellite System) 系统和欧洲的伽利略 (GALILEO) 系统等,都是应用时间测距方法进行导航定位的。

1.1.2 卫星导航系统的基本组成

卫星导航系统由导航卫星星座、地面测控网和用户导航定位设