

天文地球动力学丛书

# GNSS

## 高精度定位原理

董大南 陈俊平 王解先 著



科学出版社

# GNSS 高精度定位原理

董大南 陈俊平 王解先 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书分为 10 章,主要介绍了 GNSS 高精度定位的基本概况和基本原理。作为一种尝试,本书略写同类型书籍中常见的空间大地测量的基本原理和观测方程内容,避免与现有的教科书雷同。同时,本书从物理、通讯和地球物理的角度,以麦克斯韦电磁方程组为起点,推导并介绍 GNSS 电磁波信号的基本特征和传播介质的影响,阐述 GNSS 信号及系统误差的物理机制。同时介绍接收机内部捕获、跟踪和提取 GNSS 信号的系统设计,输出数据的压缩原理和数据传输方式,阐述 GNSS 高精度定位和定向测姿原理,以及数据分析中比较前沿的算法。

本书可作为 GNSS 定位研究领域教师和工程技术人员的参考书,也可作为研究生教材,特别适合勇于接受挑战、拓宽知识领域和开展交叉学科研究的学生和科研人员。

### 图书在版编目(CIP)数据

GNSS 高精度定位原理 / 董大南,陈俊平,王解先著.  
—北京:科学出版社,2018.10  
(天文地球动力学丛书)  
ISBN 978-7-03-059009-1

I. ①G… II. ①董… ②陈… ③王… III. ①卫星导航—全球定位系统 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 227071 号

责任编辑:徐杨峰 / 责任校对:谭宏宇  
责任印制:黄晓鸣 / 封面设计:殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版 \*  
江苏凤凰数码印务有限公司印刷  
科学出版社发行 各地新华书店经销



\*

2018 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)  
2018 年 10 月第一次印刷 印张: 19 1/4  
字数: 377 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 丛书编委会

主 编

叶叔华

编 委

(按姓氏笔画排序)

王小亚 朱文耀 胡小工 黄 瑛 董大南

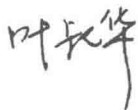
天文学是一门古老的科学,自有人类文明史以来,天文学就占据着重要的地位。从公元前 2137 年中国的最早日食记录、公元前 2000 年的木星运行周期测定、公元前 14 世纪的日食月食记录常规化、公元前 11 世纪黄赤交角测定、公元前 722 年干支记日法、公元前 700 年左右的彗星和天琴座流星群最早记载等,到公元后东汉张衡制作的浑象仪和提出的浑天说、古希腊托勒密编制当时较完备的星表、中国《宋史》的第一次超新星爆发记载、波兰哥白尼所著《天体运行论》、丹麦第谷·布拉赫发现仙后座超新星、德国开普勒提出行星运动三定律、意大利物理学家伽利略制造的第一台天文望远镜、中国明朝徐光启记录的当时中国较完备全天恒星图、荷兰惠更斯发现土星土卫六、法国卡西尼发现火星和木星自转、英国牛顿提出经典宇宙学说、法国拉普拉斯出版《宇宙体系解说》和《天体力学》、德国高斯提出行星轨道的计算方法等,再到现代河外星系射电的发现、人造卫星的出现、电子望远镜和光电成像技术的发明、月球探测器的发射等,天文学已经朝太空技术发展,朝高科技发展,朝计算科学发展,21 世纪天文学已进入一个崭新的阶段,不再限制在地球上,而是望眼于太空,天文学家已可以通过发射航天探测器来了解某些太空信息。天文地球动力学就是在这样的背景环境下从诞生到发展,不断壮大,为我国卫星导航、深空探测、载人航天、大地测量、气象、地震、海洋探测等做出了卓越贡献,编此丛书就是希望读者可以系统掌握天文地球动力学的理论和研究方法,能够为我国天文学和地球科学的后续持续发展提供保障。

天文地球动力学是 20 世纪 90 年代新兴的一门学科,是天文学与地学(地球物理学、大地测量学、地质学等)、大气科学和海洋科学等的交叉学科。自 20 世纪 70 年代以来,现代空间对地观测技术(VLBI、SLR、LLR、GPS 等)得到迅猛发展,使得测量地球的整体性和大尺度运动变化精度有了数量级的提高,也使

得对地球各圈层(大气圈、水圈、岩石圈、地幔、地核)运动变化的单个研究发展到综合研究地球各圈层的相互作用和动力学过程成为可能,于是中国科学院上海天文台成立了天文地球动力学研究中心,把天文学的观测手段、数据处理方法、卫星摄动理论、行星结构理论等与地球物理学、大地测量学、地质学、地震学、大气科学和海洋科学等紧密结合,完整系统地研究我们所居住的行星“地球”,使得地球的各种活动研究越来越深,理解越来越透,预测也越来越准。

天文地球动力学是研究地球的整体和大尺度运动及其动力学过程的学科,它所包含的内容多样而丰富,包括地球的形状、板块运动和地壳形变、地球磁场和重力场研究;包括用天文手段高精度、高时空分辨率探测和研究地球整体和各圈层物质运动状态;包括建立和维护高精度地球和天球参考系;包括综合研究地球和其他行星的动力学特性及演化过程;包括空间飞行器的深空探测、精密定轨和导航定位等的理论、技术研究及其应用;包括现代空间大地测量技术数据处理的理论和方法及其应用研究;包括相应的大型软件系统的建立和应用等等。因此天文地球动力学是一门兼具基础理论和实际应用的综合性学科,“天文地球动力学丛书”即将从有关方面给予细致描述,每个研究方向不仅含有其基本发展过程、基础理论、研究方法、最新研究成果,还含有存在的问题和未来发展的方向,是从事天文地球动力学研究不可缺少的参考书和入门教材。

“天文地球动力学丛书”将系统讲述各个研究方向,有利于研究生和有关科研人员尽快掌握该研究方向和整体把握“天文地球动力学”这门学科,同时,该学科的研究和应用有利于我国卫星导航、深空探测、载人航天、时空基准建立、板块运动研究、地壳形变监测、大气科学、海洋科学、地质学、地震学、大地测量学、地球内部结构等的发展,可以成为相关方面研究人员的教科书和工具书。



中国科学院院士

2018年8月

GNSS 高精度导航定位技术是当今导航与位置服务界需求最大、挑战最多、应用最广、因而也是发展最快的技术之一。特别是以大数据、计算机技术和计算能力为基础的人工智能的快速发展推动了智能时代的到来,对广域高精度空间位置和广域高稳定度的时间同步和协同控制的需求越来越多。当前,无论是军用领域或是民用领域,GNSS 导航与位置服务的应用场景与环境的动态性、多变性和复杂性越来越高,因而对时空位置需求的高分辨率特性、高精度特性、高稳定特性、高可靠特性和智能性的要求也越来越高。这些挑战迫使 GNSS 高精度定位技术和数据处理技术从卫星大地测量与导航专业单一思维框架中跳出去,走跨学科、跨专业、跨界融合之道。这一多技术跨界融合趋势对当今教科书及专业技术参考书的编著写作也提出了根据需求应用和问题导向、跨学科、跨领域和跨专业跨界融合的新道路。而由董大南教授牵头,汇聚了华东师范大学、同济大学和中科院上海天文台的在卫星导航高精度定位及其多种应用方面富有经验和丰硕成果的三大团队科技人员,敏锐地顺应了这种新趋势和新需求,共同编著了这本以跨学科交叉为显著特色的《GNSS 高精度定位原理》。纵观全书,深感本书体现了以下几大值得借鉴弘扬的特色。

1) 体现了需求应用和问题导向的编写新原则。21 世纪高等教育提倡要面向需求、面向问题和面向未来。这样做既能激发学生的学习探索兴趣,又能帮助学生明确学习的目标和树立学习的社会责任意识。因而教科书的编写也希望是应用需求和问题导向,而不再提倡纯学科和专业导向的模式。本书在前言和绪论中,都花了不少篇幅描述 GNSS 高精度定位的广泛需求和应用,包括在地球科学、国防领域和经济建设中的应用,特别是在 GNSS 大气和海洋环境感知与探测方面以及在测站周边积雪深度和土壤湿度等前沿领域的应用方

面的介绍,都将激发学生的责任感、探索欲和想象力。

2) 彰显了学科交叉和跨界融合的学术研究趋势。由于需求和应用问题的复杂性,欲满足当今社会经济需求,解决各类科学问题、技术问题和工程问题及社会问题,都不是单一学科和技术所能实现的。必须是多学科交叉、多领域跨界融合协同才能实现。因而学科交叉是当今国际学术研究,包括专著编写的潮流和大趋势。另外,学科间的融合衍生出新兴学科。例如本书阐述了 GNSS 和气象学、海洋学的交叉融合就衍生出 GNSS 气象学和 GNSS 反射遥感学(GNSS-R)。即使从高精度卫星定位本身来说,随着对卫星信号所包含的各种物理特性以及对传播过程中卫星信号所携带的各种信息物理特性变化的深入研究,高精度 GNSS 定位的应用已经从传统的纯几何关系的位置服务,拓展至与位置形变对应的物质负荷及构造运动、与信号的走时延迟及信噪比衰减对应的环境和介质变化监测和研究等崭新的领域。从事 GNSS 高精度定位的科研和工程技术人员除了要掌握空间大地测量的原理外,还必须熟知接收机硬件、通信、物理和地球物理等多学科知识。为此,本书简明清晰地讲解了麦克斯韦电磁波方程原理,从学科交叉出发,始终以电磁波方程的物理特性为依据,着重分析信号传播过程中与多种介质的相互作用后所发生的干涉衍射和折射散射等电磁波变化特征,来帮助读者从跨学科原理上理解 GNSS 在大气物理参数的三维探测和可降水汽探测、海洋波浪场和风场探测等跨界应用方式。我欣慰地体会到作者在本书的阐述中,自始至终都颇具匠心地坚持学科交叉和跨界融合的书写方式,这对读者的跨学科和跨界融合意识的培养提升是能起到潜移默化的作用的。

3) 富有创新性、前瞻性和启发性。本书并不局限于介绍国内外现有的研究,在此基础上提出了很多创新的观点和概念,例如广义实数自由度,广义约束和广义多路径效应等等。虽然这些新概念新观点还有待于时间的检验和国际上的进一步认可,但它的提出为本书注入了新的视点而富有启发性。此外,本书详细论证和讨论了目前成熟的理论,而且披露了当今国际上尚未解决的难题和亟须发展的理论,例如高度相关参数的解算理论。这些前沿的方向性的信息必将激励广大的科研人员,特别是年轻的学生去攻克难题,同样具有极强的启发作用。

综上所述,本书是作者应对这种迫切新需求和新趋势所做的一次可喜的尝试。作者根据自己多年在 GNSS 高精度定位和地球物理应用研究方面的心得和体会,在内容上略写了同类书籍中出现多次的 GNSS 定位的几何关系式内容,重点讲述



了空间大地测量与物理、通讯和地球物理交叉的内容和信号的物理机制,给出了严谨的公式表达和推导,阐述了高精度 GNSS 定位定向原理和新的生长点,介绍了前沿的数据分析方法和挑战。相信本书的出版能够加深对 GNSS 信号本质和机制的认识,启发相关领域更多的原创性研究。基于此,我向感兴趣的科研工作者、学生及工程技术人员强烈推荐这本目前国内外不可多见的 GNSS 高精度定位原理、方法和应用方面的专著。

刘经南

中国工程院院士

2018 年 7 月

GNSS 是 Global Navigation Satellite System(全球卫星导航系统)的简称,目前包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo 和中国的北斗卫星导航系统,此外印度的 IRNSS、日本的 QZSS 区域卫星导航系统正在建设中。

1957 年,苏联成功地发射第一颗人造地球卫星,标志着人类进入了空间时代。空间时代的开启推动了导航、通讯、电子和固体半导体、时频元件和信号处理等一系列技术的全方位革命性的发展,同时无线电定位系统也开始由陆基转为星基。由于军事、交通、通信和航天等领域的需要,美国和苏联开始筹划构建一个高精度、全天候、全方位的连续实时定位系统,也就是在全球任何地点(包括近地空间)、任何时间都能得到精度为米级的三维位置信息。在太空竞赛第一回合中落后的美国在发展卫星定位系统中取得了领先,扳回一局。伴随着航天和电子通信技术的发展,1973 年美国在海军的子午仪(transit)卫星导航系统的基础上,整合了空军和陆军的伪随机码等技术,由国防部(Department of Defense, DoD)牵头研制并批准了第一期 NAVSTAR GPS 卫星的发射计划。1978 年,Block I GPS 卫星开始发射,1989 年,Block II GPS 卫星开始发射,真正实现了全球高精度全天候的连续定位和授时。苏联虽然早在 1968 年就开始筹划构建卫星导航系统,但是由于种种原因直到 1976 年才正式启动 GLONASS 项目。由于当时苏联的卫星和电子的设计、工艺水平还较为落后,早期的测试卫星寿命只有一年。直到 1987 年以后,GLONASS 卫星才正式成型,卫星的设计寿命提高到三年左右。苏联的解体使 GLONASS 的发展受到一些延误,20 世纪 90 年代起,俄罗斯延续了 GLONASS 的研发,并于 2007 年开始向大众提供定位服务。虽然它打破了美国在定位导航服务上的独家垄断,由于时间差,当时定位导航服务的市场还是 GPS 一枝独秀的局面。

在 GPS 投入使用的早期,定位是通过伪距码实现的。GPS 卫星发布两套

伪距码: P 码也称精码,是军用码,目前它单点定位的精度在 1 m 以内;C/A 码也称粗码,是民用码,目前它单点定位的精度为 10 m。1978 年,麻省理工学院的 Counselman 教授的研究团队提出可用 GPS 的载波相位定位方案,其定位精度可达厘米级,紧接着他们在海斯塔克(Haystack)天文台停车场用宏米(Macrometer™)接收样机首次实现了载波相位定位,验证了厘米级精度,并进一步研发了载波相位定位特需的整数模糊度固定技术。从此,GPS 以厘米级至毫米级的高精度定位在科研、军事、测绘等领域得到了广泛的应用,并且进一步延拓到交通运输等大众化应用行业,走进了千家万户的日常生活。

20 世纪 90 年代海湾战争的“沙漠风暴”行动中,首次在战争中应用的 GPS 系统的表现让全世界大开眼界。在毫无参照物的茫茫沙海,夜间的美军士兵和直升机可以准确地知道自己的位置。此后的科索沃战争中装备 GPS 的远程导弹更显示了“千里穿杨”精准命中目标的神功。GPS 系统显示的巨大潜力、威胁和商业利益使得世界各国都在考虑建立自己的卫星导航系统。欧盟和欧洲太空局开始研发伽利略(Galileo)全球卫星导航系统,并于 2003 年发射了第一颗卫星。中国自 20 世纪 80 年代就开始筹划全球卫星导航系统,继 2000 年成功发射北斗一号卫星后,2007 年发射了第一颗北斗二号卫星。2012 年,北斗二代卫星已经覆盖了整个亚太地区。到 2020 年,北斗卫星将实现全球覆盖。自此确立了当今四足鼎立的世界格局,GNSS 成了这四个系统的总称。当然,这中间既有竞争也有合作。天空中同时出现这四个系统的卫星使得各地可见卫星的数目更多,分布更均匀,用四个系统卫星联合定位的精度更高,解的稳定性也更好,这对于科研和位置服务产业无疑是一大福音。

卫星导航系统的迅猛发展、利用高精度定位数据开展相应的理论和应用研究的深入、位置服务产业的日益丰富和完善,这三方面的综合因素扩大了对卫星导航定位人才的需求。全国许多高校开设了卫星导航和空间大地测量有关专业,招收和培养了一大批有志于该领域的本科生和研究生。读者对卫星导航和空间大地测量专业教材数量的需求和质量的要求也日益提高。目前已经出版了一批空间大地测量和导航定位专业的教材,但由于这个领域的发展和知识更新很快,仍然迫切需要涵盖最新发展所需知识的空间大地测量方面的教材,特别是具有一定深度且能够和地球物理机制交叉的学术专著。

鉴于这些方面的迫切需求,作者总结了自己多年来在 GNSS 定位原理和应用

方面研究的体会和经验,编写了本书。在编写的过程中,我们着重增加了其他书籍中没有或较少出现的内容,特别是和物理、通信、地球物理学交叉的内容。对其他书籍中已出现较多的内容,我们力求精简以减少雷同。例如在 GNSS 数据分析中非常重要的卫星轨道力学和卫星定轨理论,因为已经有很多书给出了详尽的推导和讨论(Xu and Xu, 2016;王小亚等,2017),本书不再赘述。因此,本书把重点放在高精度地面定位的原理部分,让读者不仅知道它的分析模型和解算步骤,而且了解它的物理机制和这么做的理由。本书要求读者具备一定的物理、通信和地球物理基础,适合愿意接受挑战、希望学到前沿知识的空间大地测量专业的学生和希望拓宽到交叉学科应用研究的教师和科研人员。

本书是华东师范大学空间信息与定位导航上海高校工程研究中心(董大南负责)和中国科学院上海天文台卫星导航实验室(陈俊平负责)、同济大学测绘学院(王解先负责)三个团队共同合作的结果,编写的内容总结了作者二十多年的研究成果和心得,同时也参照了国内外同行的研究成果和最新的发展。本书的宗旨是提供其他参考书籍较少涉及的内容并深入介绍,许多内容具有一定的前沿性和创新性,可作为同类型学术专著的一个补充。

本书在编写过程中得到了研究团队其他教师和研究生的大力支持和帮助:张雷老师编写了第4章;余超老师编写了9.4节;陈雯老师编写了9.5节;研究生彭宇、王栳人、王明华、颜君、陈一佳、夏宇飞、季翔、黄晨、曹洁、姚瑶、吕晶阳、于鹏伟、楼明明、董雅璇、赵甜甜、吕聪、董鑫媛、熊雅俊、李博等同学帮助整理了第1章、第2章、第5章和第6章的大部分内容,并且协助完成了整本书的图片和格式调整。在此对他们的无私帮助和奉献表示诚挚的感谢。

董大南

2018年5月

丛书序  
序言  
前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 GNSS 发展历史 .....	1
1.2 现代卫星导航系统 .....	2
1.2.1 GPS 卫星导航系统 .....	2
1.2.2 GLONASS 卫星导航系统 .....	5
1.2.3 Galileo 卫星导航系统 .....	6
1.2.4 北斗卫星导航系统 .....	7
1.3 GNSS 高精度定位应用 .....	8
1.3.1 走向高频 .....	8
1.3.2 从误差源到信息源 .....	8
1.3.3 单天线扩展到多天线 .....	9
1.3.4 多技术融合 .....	9
1.3.5 高精度动态应用 .....	10
1.3.6 GNSS 无线电掩星探测 .....	11
<b>第 2 章 GNSS 信号构成</b> .....	12
2.1 GPS 信号构成 .....	12
2.1.1 载波 .....	12
2.1.2 伪码 .....	13

2.1.3	数据码	16
2.1.4	导航电文	17
2.2	其他导航系统的信号构成	18
2.2.1	GLONASS 卫星信号	18
2.2.2	Galileo 系统的信号构成	19
2.2.3	北斗导航系统	20
<b>第 3 章</b>	<b>GNSS 信号的基本特征和传播</b>	<b>22</b>
3.1	电磁波信号的物理特征	22
3.1.1	麦克斯韦方程组和平面电磁波	22
3.1.2	电磁波的频率特征	26
3.1.3	电磁波的极化特征	27
3.1.4	电磁波的干涉和衍射	28
3.1.5	电磁波的多普勒效应	29
3.2	GNSS 信号的传播: 从自由空间到地面	30
3.2.1	GNSS 信号在电离层中的传播	30
3.2.2	GNSS 信号在对流层中的传播	38
3.2.3	GNSS 信号在地面的广义多路径效应	51
	计算和思考	63
<b>第 4 章</b>	<b>卫星信号处理</b>	<b>65</b>
4.1	GNSS 接收机捕获原理	65
4.1.1	串行捕获算法	66
4.1.2	基于 FFT/IFFT 的并行捕获算法	68
4.1.3	弱信号的捕获算法	70
4.2	GNSS 接收机跟踪原理	74
4.2.1	载波跟踪算法	74
4.2.2	码跟踪算法	83
4.3	软件接收机系统设计与分析	86
4.3.1	系统总体架构	87
4.3.2	射频信号接收硬件设计与分析	87

<b>第 5 章 地面接收端产生的误差</b> .....	94
5.1 卫星和接收机天线相位中心偏差 .....	94
5.1.1 微波暗室测定 .....	95
5.1.2 室外机器人测定 .....	96
5.1.3 室外短基线测定 .....	97
5.2 多路径误差 .....	100
5.2.1 多路径误差定义 .....	100
5.2.2 多路径特征 .....	100
5.2.3 多路径消除方法概述 .....	103
5.3 接收机钟差和周跳 .....	105
5.3.1 接收机钟误差 .....	105
5.3.2 接收机周跳 .....	105
5.4 空基和地基相位缠绕 .....	106
5.4.1 相位缠绕效应 .....	106
5.4.2 空基相位缠绕 .....	107
5.4.3 地基相位缠绕 .....	107
<b>第 6 章 卫星数据压缩与传输</b> .....	112
6.1 数据压缩基本原理与信息熵 .....	112
6.1.1 数据压缩的信息论基础 .....	112
6.1.2 信息熵与冗余度 .....	113
6.1.3 数据压缩的性能指标和标准 .....	115
6.2 卫星信号压缩技术 .....	116
6.2.1 有损压缩 .....	116
6.2.2 无损压缩 .....	117
6.2.3 GNSS 数据的 Hatanaka 压缩 .....	118
6.3 接收机输出的数据传输 .....	121
6.3.1 TCP/IP 协议的层次结构 .....	121
6.3.2 IP 协议 .....	122
6.3.3 TCP 协议 .....	124
6.3.4 TCP/IP 协议在卫星数据传输中的应用 .....	129

6.4	基于 UDP 的卫星数据传输 .....	129
6.4.1	UDP 通信协议概述 .....	130
6.4.2	UDP 数据报格式 .....	130
6.4.3	UDP 基本工作过程 .....	132
<b>第 7 章</b>	<b>坐标系统和时间系统 .....</b>	<b>134</b>
7.1	坐标系统 .....	134
7.1.1	地心坐标系 .....	135
7.1.2	地理坐标系 .....	135
7.1.3	测站坐标系 .....	136
7.1.4	卫星固连坐标系 .....	136
7.1.5	我国采用的高斯平面坐标系和高程系统 .....	137
7.1.6	空间坐标与高斯平面坐标的转换 .....	138
7.1.7	大地参考系统和大地参考框架 .....	141
7.1.8	国际大地参考框架 .....	141
7.1.9	ITRF 实现的难点 .....	143
7.2	时间系统 .....	146
7.2.1	时间系统的定义 .....	147
7.2.2	时间系统之间的转换 .....	149
7.2.3	GNSS 时间系统 .....	151
7.2.4	守时和授时 .....	152
	计算和思考 .....	153
<b>第 8 章</b>	<b>GNSS 高精度定位原理 .....</b>	<b>154</b>
8.1	GNSS 观测量 .....	154
8.1.1	伪距测量及其观测方程 .....	154
8.1.2	载波相位测量及其观测方程 .....	154
8.1.3	观测方程的线性组合 .....	157
8.2	误差改正 .....	158
8.2.1	对流层延迟误差改正 .....	159
8.2.2	电离层延迟误差改正 .....	160



8.2.3	与卫星有关的误差	161
8.2.4	测站相关修正	163
8.2.5	多路径效应的实时模型改正	165
8.3	单站精密单点定位	167
8.3.1	单站精密单点定位的函数模型	167
8.3.2	单站精密单点定位的随机模型	169
8.3.3	单站精密单点定位的参数估计方法	170
8.4	多系统精密单点定位	174
8.4.1	GPS/GLONASS 综合数据处理统一模型	174
8.4.2	GPS/GLONASS 系统时延偏差	176
8.4.3	频间差特性分析	179
8.5	载波相位差分技术	182
8.6	观测值中的周跳检测	189
8.6.1	多频周跳探测算法	189
8.6.2	单频周跳探测算法	195
8.7	整周模糊度估计算法	196
8.7.1	参数估计理论和 FARA 算法	196
8.7.2	最小二乘模糊度搜索算法	199
8.7.3	Z 变换和 LAMBDA 算法	200
<b>第 9 章</b>	<b>GNSS 定向测姿原理</b>	<b>205</b>
9.1	GNSS 定向测姿的需求	205
9.2	GNSS 定向测姿的基本原理	206
9.3	共用时钟 GNSS 多天线接收机的定向测姿技术	208
9.3.1	共用时钟 GNSS 多天线接收机测姿原理	208
9.3.2	测姿算法中单差和双差等价性讨论	209
9.3.3	单差模糊度估计的 ASA 算法	213
9.4	GNSS/INS 紧耦合定位定向测姿的基本原理	216
9.4.1	GNSS/INS 紧耦合数学模型	216
9.4.2	INS 误差状态方程	217
9.4.3	GNSS/INS 紧组合系统的状态方程	218