

学 术 著 作 丛 书

*Orientation Determination*

*Technology Based on Satellite Navigation System*

# 卫星定向技术

主编 吴美平 副主编 胡小平

国防科技大学出版社

# 卫星定向技术

主 编:吴美平

副 主 编:胡小平

参编人员:胡小平

唐康华

刘志俭

吴美平

赵健康

张小安



国防科技大学出版社

湖南·长沙

图书在版编目(CIP)数据

卫星定向技术/吴美平主编.—长沙:国防科技大学出版社,  
2007.12

ISBN 978-7-81099-452-1

I.卫… II.吴… III.全球定位系统(GPS) IV.P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 146663 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gkdcb.com>

责任编辑:唐卫葳 责任校对:文慧

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

开本:850×1168 1/32 印张:12.75 字数:331千

2007年12月第1版第1次印刷 印数:1-1500册

ISBN 978-7-81099-452-1

定价:32.00元

## 前 言

未来战争是高技术条件下的局部战争,是陆、海、空、天、电一体化的立体战争。战争形态和作战样式都发生了很大的变化,战场信息化成为战争的基本特征。信息技术已经渗透到武器装备、作战手段和作战指挥之中。从一定意义上说,未来战争中掌握和控制信息的能力和水平,将成为决定战争胜负的关键。

在 C<sup>4</sup>KISR 的基础上,进一步构建基于网络中心战和全球信息网络的信息化作战体系结构,实现“主导机动、精确打击、全维防护、集焦后勤”的目标,在战争中夺取信息优势、决策优势,乃至夺取全维优势。在信息化战场上,包括信息的获取、传播、辨识、分析及作战命令形成等诸多环节中,获取各种武器系统的运动信息、准确判断敌方目标、实施精确打击,都离不开导航定位。导航定位技术对形成战场态势感知和电子战能力、远程精确打击能力、快速机动能力以及诸军兵种一体化联合作战能力,都具有非常重要的作用。

对于越来越需要“打得准、打得狠、打得快”的武器装备来说,导航系统具有支撑、保障和全局作用,是现代武器装备的基准信息源和中心信息源,在现代化高技术战争中具有不可替代的地位。洲际导弹、核潜艇、巡航导弹、战术导弹、军用飞机、水面舰艇、陆地战车以及包括卫星在内的各种航天飞行器乃至信息化单兵都需要导航设备。同时,近年来的局部战争表明,精确打击武器是现代高

技术战争的主战武器,而导航系统技术则是精确打击武器的基础和核心技术之一。

卫星导航定位系统的出现,特别是 GPS 的建成并投入应用,在武器制导、导航和控制技术领域引起了一场影响深远的变革。GPS 在全球范围内的三维精确定位、测时、测速和测定姿态的能力,使其成为先进的导航系统,有“现代罗盘”之称。由于卫星导航技术的发展,尤其是 GPS 导航技术在精确制导武器中的应用,大幅度提高了制导精度尤其是远程导弹的精度,并且通过典型的“发射后不管”的制导方法大幅度减少了精确制导武器在作战中的使用危险,大幅度降低了精确制导武器本身的费用,因此受到了各国军方的重视,各国在卫星导航应用技术上投入了大量研究资源,以期提高武器装备的信息含量。

我们课题组于 1995 年开始研究 GPS 定向定姿技术,1998 年针对我国的“北斗一号”卫星导航系统研究“北斗一号”定向定姿技术,并在某型武器系统中进行了试验验证。本书以作者多年的科学研究成果为基础,深入、系统地论述了基于卫星载波相位干涉测量的定向定姿技术的基本理论、工程实现与应用。全书内容分为三部分:第一部分阐述了卫星定向技术的起源与发展、关键技术发展概况以及典型应用背景;第二部分重点针对目前应用最为广泛的 GPS 全球定位系统,全面论述卫星载波相位测量原理、GPS 定姿基本原理、误差模型以及在武器系统中的典型应用,并结合当前发展趋势,详细介绍了 GPS 与惯性导航系统的全组合导航技术;第三部分以我国第一代卫星导航定位系统——“北斗一号”为对象,探讨了北斗无源定位方法,提出了适合于双星及单星的模糊度确定方法,建立了双星定向原理模型,实施了双星定向原理样机的静

态及车载动态实验。

本书由吴美平、胡小平策划和主编。吴美平、胡小平完成了第一章的编写；吴美平、赵健康、唐康华、刘志俭、何晓峰完成了“GPS定姿技术”内容的编写；逯亮清、吴美平、胡小平、张小安完成了“北斗定向技术”内容的编写。本书力求反映卫星定向定姿技术的关键技术研究成果，突出工程实践与理论发展，为相关专业技术人员提供技术参考。同时，本书也适用于导航技术及相关专业的研究生教材。囿于卫星导航技术随着军事技术的发展得以迅速发展，编者的实践经验和认识水平有限，本书难免存在错误和不妥之处，敬请读者指正。

本书在编著过程中，编者参考了课题组其他教师的研究成果和部分研究生的论文，并得到他们的大力帮助；同时，国防科技大学出版社同志对本书的出版给予了极大的支持与帮助，在此一并表示诚挚的感谢。

作者

2007年7月

# 目 录

## 第一章 卫星定向技术的发展

§ 1.1	卫星定向技术起源	( 1 )
§ 1.2	卫星定向技术发展历程	( 2 )
§ 1.3	卫星定向关键技术及其发展	( 9 )
1.3.1	模糊度问题的本质	( 9 )
1.3.2	模糊度求解技术的发展	( 10 )
1.3.3	未来发展趋势	( 19 )
§ 1.4	卫星定向技术的应用领域	( 19 )
1.4.1	卫星快速寻北技术	( 20 )
1.4.2	辅助惯导系统快速初始对准	( 20 )
1.4.3	变形监测	( 21 )
1.4.4	辅助炮兵阵地联测、战略导弹发射方位 确定	( 22 )
1.4.5	卫星/INS(Inertial Navigation System)组合 航向确定技术	( 22 )
	参考文献	( 23 )

## 第一部分 GPS 定姿技术

## 第二章 GPS 载波相位测量技术

§ 2.1	载波相位测量及模型	( 36 )
-------	-----------	--------

§ 2.2	相对位置测量模型 .....	(42)
2.2.1	单差相位观测量相对位置测量 .....	(42)
2.2.2	双差观测量相对位置测量 .....	(48)
2.2.3	三差观测量相对位置测量 .....	(50)
§ 2.3	载波相位测量误差分析 .....	(51)
2.3.1	对流层折射 .....	(52)
2.3.2	电离层折射 .....	(54)
2.3.3	多路径效应 .....	(55)
2.3.4	相对论效应 .....	(57)
2.3.5	接收机时钟误差 .....	(60)
2.3.6	轨道误差 .....	(61)
2.3.7	天线相位中心偏差 .....	(61)
	参考文献 .....	(62)

### 第三章 GPS 姿态测量原理

§ 3.1	GPS 定向及其精度 .....	(63)
3.1.1	基本原理 .....	(63)
3.1.2	方向角求解 .....	(65)
3.1.3	方向角精度 .....	(67)
§ 3.2	GPS 定姿及其精度分析 .....	(68)
3.2.1	三天线定姿 .....	(68)
3.2.2	四天线定姿 .....	(74)
	参考文献 .....	(78)

### 第四章 整周模糊度技术

§ 4.1	引言 .....	(79)
§ 4.2	整周模糊度求解的一般流程 .....	(82)
4.2.1	模糊度的估计 .....	(82)
4.2.2	模糊度的搜索 .....	(89)



	4.2.3 模糊度的确认 .....	(108)
§ 4.3	基于多种约束模糊度搜索算法研究 .....	(109)
	4.3.1 已知基线长度对模糊度的约束作用 .....	(110)
	4.3.2 基线长度约束的几何解释 .....	(113)
	4.3.3 天线的特殊配置对模糊度的约束作用 .....	(116)
	4.3.4 姿态角对模糊度的约束作用 .....	(120)
	4.3.5 试验方法及结果 .....	(128)
	4.3.6 试验结果分析 .....	(132)
§ 4.4	基于双频接收机的模糊度求解 .....	(133)
	4.4.1 模糊度的组合 .....	(134)
	4.4.2 双频接收机的模糊度求解 .....	(137)
	参考文献 .....	(141)

## 第五章 GPS 定姿技术在武器系统中的应用

§ 5.1	GPS 定姿在火炮火控系统中的应用 .....	(145)
	5.1.1 试验目的与原理 .....	(145)
	5.1.2 试验项目与步骤 .....	(146)
	5.1.3 试验内容与结果 .....	(147)
	5.1.4 试验结论 .....	(154)
§ 5.2	GPS 定向定姿在舰载炮指挥控制系统中的应用 .....	(154)
	5.2.1 舰载炮指挥控制系统原理概述 .....	(155)
	5.2.2 GPS 定姿在舰载炮指挥控制系统目标 侦查测量分系统中的应用 .....	(155)
	5.2.3 炮船(阵地船)的姿态确定:基于 GPS/SINS 确定舰船的姿态 .....	(163)
	参考文献 .....	(166)

## 第六章 SINS/GPS 全组合导航技术

§ 6.1	SINS/GPS 全组合导航方案设计	(167)
6.1.1	全姿态 + 速度组合导航方案	(167)
6.1.2	偏航角 + 水平速度组合导航方案	(169)
6.1.3	硬件空间配置方案	(170)
§ 6.2	GPS/INS 全组合导航技术	(171)
6.2.1	GPS/INS 全组合导航状态方程	(171)
6.2.2	GPS/INS 全组合导航测量方程	(177)
§ 6.3	基于惯导辅助的 GPS 航向姿态参考系统	(181)
6.3.1	问题的提出	(181)
6.3.2	时间同步问题	(183)
6.3.3	惯导数据对姿态确定的辅助作用	(184)
6.3.4	试验验证	(184)
§ 6.4	载波相位姿态确定技术在 SINS 动基座初始对准中的应用	(186)
6.4.1	问题的提出	(186)
6.4.2	卡尔曼滤波器的设计	(187)
6.4.3	仿真结果	(190)
§ 6.5	基于惯导数据的周跳检测和修复	(192)
	参考文献	(196)

## 第二部分 “北斗”定向技术

### 第七章 “北斗”卫星导航技术

§ 7.1	“北斗”导航定位系统构成	(200)
§ 7.2	“北斗”导航定位系统工作原理	(202)
§ 7.3	“北斗”导航定位系统定位基本方法及精度	(204)

7.3.1	定位基本原理	(204)
7.3.2	差分技术	(205)
7.3.3	用户高程提供方法与精度	(206)
7.3.4	解决多值解的措施	(206)
§ 7.4	“北斗”无源定位方法	(207)
7.4.1	利用地面伪卫星站辅助的无源定位	(207)
7.4.2	利用用户原子钟辅助的北斗无源定位	(210)
7.4.3	两类定位方式精度分析及数学仿真	(211)
	参考文献	(222)

## 第八章 “北斗”定向原理

§ 8.1	卫星定向基本原理	(224)
8.1.1	载波相位观测方程	(224)
8.1.2	载波相位干涉测量模型	(226)
8.1.3	多星系统单历元定向模型	(229)
8.1.4	双星系统单历元定向模型	(231)
§ 8.2	基于转动基线的双星定向模糊度确定方法	(235)
8.2.1	基于运动思想的转动基线解模糊法	(235)
8.2.2	基于交换天线思想的转动基线解模糊法	(239)
§ 8.3	基于外部辅助信息的双星定向模糊度函数方法	(262)
§ 8.4	单星寻北方法探讨	(270)
8.4.1	解析法单星定向	(271)
8.4.2	检测法单星确定方位	(283)
§ 8.5	周跳检测方法	(290)
§ 8.6	卫星及用户位置信息获取	(294)
§ 8.7	本章小结	(295)

参考文献	(296)
------	-------

## 第九章 “北斗”定向精度分析

§ 9.1 观测方程线性化分析	(298)
§ 9.2 北斗定向精度线性化分析数学仿真	(304)
9.2.1 载波相位、基线长度测量精度对定向精度的影响	(305)
9.2.2 基线初始二维姿态对定向精度的影响	(307)
9.2.3 用户位置对定向精度的影响	(308)
9.2.4 基线长度与观测历元数对定向精度的影响	(310)
§ 9.3 蒙特卡洛仿真分析	(312)
9.3.1 蒙特卡洛仿真目的	(312)
9.3.2 随机数、正态分布随机变量的生成及采样点数的确定	(313)
9.3.3 蒙特卡洛仿真结果及与线性化分析的对比	(315)
§ 9.4 北斗定向误差特殊表现原因探析	(318)
§ 9.5 本章小结	(329)
参考文献	(330)

## 第十章 北斗定向技术的实现

§ 10.1 北斗定向系统组成	(331)
§ 10.2 天线相位中心偏移标校实验	(335)
10.2.1 单天线瞬时相位中心漂移幅度标校	(336)
10.2.2 单天线稳定相位中心偏移标校	(339)
10.2.3 双天线稳定相位中心相对关系标校	(343)

§ 10.3	北斗定向静态实验 .....	(345)
10.3.1	静态重复精度测试 .....	(346)
10.3.2	静态绝对精度测试 .....	(349)
§ 10.4	北斗定向车载动态实验 .....	(350)
10.4.1	等效转动极大/极小值解模糊方法有效性验证 .....	(352)
10.4.2	车载北斗实时定向精度验证 .....	(355)
§ 10.5	北斗定向实验精度分析 .....	(365)
§ 10.6	本章小结 .....	(367)
	参考文献 .....	(368)

## 附录 1 向量及其导数定义

A1.1	向量及向量导数 .....	(369)
A1.2	单位向量求导(三维) .....	(369)
A1.3	向量叉乘之偏导 .....	(370)

## 附录 2 双星载波信号统计特性分析

A2.1	相关性分析 .....	(372)
A2.2	正态性分析 .....	(380)
A2.3	结 论 .....	(391)
	参考文献 .....	(392)

## 第一章 卫星定向技术的发展

### § 1.1 卫星定向技术起源

卫星定向是基于卫星载波相位信号干涉测量原理,确定空间两点所成几何矢量在给定坐标系下的指向。空间两点一般是指两个测量天线的物理相位中心,而坐标系可以选地心地固坐标系 ECEF(Earth Centered Earth Fixed)、当地水平坐标系或体坐标系。目前,常用的是当地水平坐标系,如北天东坐标系,此时根据基线矢量可直接解算得到其相对于真北基准的方位角和相对于水平面的俯仰角。

卫星定向中的载波相干测量原理源于上世纪 60 年代末发展起来的甚长基线干涉测量技术 VLBI (Very Long Baseline Interferometry)<sup>[1-5]</sup>。VLBI 的基线往往长达几十甚至上千公里。VLBI 最初用于天体物理、天体测量和空间大地测量,由于其特有的超高空间分辨率和定位精度,并能全天候、全天时被动观测,问世不久就广泛地应用于航天测控、精密时间比对等新的学科领域。

上世纪 90 年代还发展了空间 VLBI——SVLBI(Space Very Long Baseline Interferometry)或 OVLBI (Orbiting Very Long Baseline Interferometry)技术<sup>[6-8]</sup>,观测信号相对天线均可视为平面波。卫星定向可看作按一定比例缩微了的利用人造天体载波信号实施“VLBI”的应用分支之一。尽管相对 VLBI 而言,星站距离较近(中

高轨道卫星高度约几万公里),当基线长度仅为数十米至数百米量级时,多个天线对卫星载波信号同步观测仍可近似将其看作平面波。而且由于卫星定向无需 VLBI 那么高的角度分辨率(最高可达微角秒级),因此平面波的假设对于短基线卫星定向而言引入的角度误差是可以忽略的。

### § 1.2 卫星定向技术发展历程

卫星定向技术是伴随着全球定位系统 GPS 的发展而逐渐成为国内外卫星导航相关领域的研究热点,其发展历程大致可分为三个阶段。

第一阶段:20 世纪 70 年代末至 80 年代初,主要表现为卫星载波相位干涉测量思想的提出以及初步理论的形成。

在此期间,由于 GPS 空间星座尚未完善以及终端硬件开发缓慢且价格昂贵,这方面的工作主要是进行仿真研究。早在 GPS 建设初期,1976 年 Spinney<sup>[9]</sup> 在 ION 国家航天会议上首次提出利用 GPS 卫星载波相位测量确定载体姿态,被普遍认为是卫星定姿定向思想的首创者。随后 Ellis 与 Greswell<sup>[10]</sup> 发展了以 GPS 作为信号源的干涉定姿系统线性误差模型,以此来估计航天器的三轴姿态及陀螺的不对准角与漂移,并给出了相应的数字仿真结果。几年后,Greenspan 等人<sup>[11]</sup> 阐明了利用 GPS 载波相位进行精密测距的技术及其优势,Brown 等人<sup>[12]</sup> 提出将载波相位用于方位确定,通过仿真表明经动态辅助的 GPS 干涉仪可达到 50 微弧的相对精度。随后,Joseph 和 Deem<sup>[13]</sup> 于 1983 年公布了利用静态单基线接收机系统得到的实验结果。

第二阶段:从 20 世纪 80 年代中期至 90 年代中期。  
随着 GPS 空间系统的逐步完善和接收机技术的不断发展,对

GPS 卫星定向相关技术的研究也逐渐开展起来,此间重点在于卫星定向方法及关键技术的研究与实验验证,特别是利用较高性价比 GPS OEM(Original Equipment Manufacturer)接收板组建定姿定向系统的研究开发成为可能,并逐步发展为卫星导航领域中的一个研究热点。另外,精度与可靠性的不断提高也成为关注的重点。

一项新技术的出现,往往总会首先得到相关军事应用背景的推动与支持,卫星定向技术问世不久就引起了美国军方的关注。美国陆军测绘工程中心应美陆军炮兵学校的要求,最早于 1984 年开始着手微波干涉测量技术的研究,在 1989 年同 Magnavox、Texas 仪器和 Adroit 三家公司签订了开发便携式 ADS(Azimuth Determination System)的合同,要求方位实时确定精度为  $0.5\text{mil} \sim 3\text{mil}$ <sup>[14-15]</sup>。1990 年 9 月在美陆军炮兵学校对所开发的三套 1m 基线长度的 ADS 系统进行了试验,通过试验结果与方位真值的对比表明,三套系统均可成功地确定方位,其中以 Adroit 的 ADS 系统方位确定精度最高,对 6 个目标的方位确定中最差的一个也优于  $4.5\text{mil}$ ,另外两套系统则分别为  $7.38\text{mil}$  和  $12.10\text{mil}$ 。文献[16]对 Adroit 利用 Ashtech XII 型商用测量接收机改进而成的 GPS 方位确定系统及其测试过程和结果进行了详细阐述,称该系统 30s 内的方位测量精度均值为  $0.0675^\circ$ 。

Brown 与 Ward<sup>[17]</sup>利用 TI(Texas Instruments)公司专门设计的 AN/PSN-9 型 5 通道 GPS 接收机构建了一个双天线定向系统,用于美陆军的火炮瞄准系统。实验结果表明,当双差相位观测精度在  $1\%$  周( $1\sigma$ )、基线长度 1m 的情况下,经过滤波处理的最终方位定向精度为  $0.03^\circ$ 。Gilkey 等人<sup>[18]</sup>采用 Leica 型 6 通道单频 C/A 码 GPS 接收机组建了一套基线长度约 6 倍 L1 载波波长(即  $1.14\text{m}$ )的两天线单轴定姿系统,用于确定火炮、坦克等武器炮管中轴线的方位角及高低角,并利用倾斜计提供仰角先验信息,进行了多组实验,对比了几种不同的天线安装方式对多径效应的抑制性能,经过



30min 检校去除系统偏差后的定向精度评估,以及由于接收机噪声与多径影响引起的定向随机误差评估。

在 1998 年的 ION 年会上, Rockwell Collins 公司的 Ulmer 和 Sutton<sup>[19]</sup> 描述了一种单兵便携式军用 GPS 定向装置,重点讨论了与差分天线相位接收模式相关的误差源,并在软件实现中加以补偿以进一步提高定向精度。差分天线相位接收模式主要是特定天线安装的函数,可事先对其测量并在软件中利用相位图查表方法进行精确补偿。其研究成果可用于诸如定向能武器(迫击炮、榴弹炮)、目标定位系统(激光测距、声波测距、雷达测距)、遥控无人地面车等各种需要精确方向信息的装置。Sutton 在该会议的另一篇文章中<sup>[20]</sup> 进一步讨论了双天线间差分相位图的测量方法,针对现有微波暗室检测成本高昂、静态检测耗时多的不足,提出了一种单轴旋转天线阵的新技术,通过 180° 旋转来求解基线矢量初值以及整周模糊度,然后详细介绍了各历元单差观测量中时钟相对偏差的计算过程,并对时钟漂移进行多项式拟合建模,从而极大地提高了基线垂直分量估计精度,可显著提高 GPS 定向定姿的精度。利用该方法得到的相位图计算结果与微波暗室基本一致,虽然分辨率稍低,但具有成本低、实现简单等优势。

第三阶段:20 世纪 90 年代中期以后。主要表现为 GPS 定向技术逐步成熟,工程化应用日益普遍,并出现了多种商用 GPS 定向测姿产品;关键技术取得了一系列理论突破,与其它学科理论呈现交叉融合的趋势。

随着卫星定向技术的不断成熟,由于其具有小型化、精度高、不受磁场影响、成本低等优点,出现了“GPS 罗盘”的概念。Tu 等人<sup>[21]</sup> 利用 Magnavox MX4200 型 GPS 接收机及相应的指向部件、控制器设计了一种 GPS 罗盘,意图取代导航系统中诸如磁罗盘、陀螺等传统的方位确定装置,但精度较差(1m 基线仅为 1° 方位指向精度),没有对转角精度进行分析,且对基线调平精度要求过高。