



卫星定向技术 (第2版)

Weixing Dingxiang Jishu

吴美平 胡小平 逯亮清 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

卫星定向技术(第2版)

吴美平 胡小平 逯亮清 著
何晓峰 唐康华 祝建成

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书在以作者多年的科学技术研究成果为基础,深入、系统地论述了卫星载波相位测量定向定姿技术的基本理论、工程实现与应用。全书内容包括三部分:概述篇阐述了卫星定向技术发展概况以及典型应用背景;原理与技术篇全面论述了卫星载波相位定姿基本原理、误差模型、载波相位模糊度确定关键技术,并结合当前发展趋势,详细介绍了卫星与惯性导航的全组合导航技术;应用与实现篇介绍了卫星定向/低成本惯性全组合导航技术在军用及民用领域的成功应用案例——舰载火炮应用与车载移动卫星通信应用,并对基于我国第一代卫星导航定位系统——北斗导航试验系统的无源定向技术进行了工程实现,构建了北斗双星定向原理样机并完成了静态与车载动态实验。

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,为相关专业人员提供有价值的技术参考

图书在版编目(CIP)数据

卫星定向技术/吴美平等著.—2版.—北京:国防工业出版社,2013.8.

ISBN 978-7-118-09031-4

I. ①卫... II. ①吴... III. ①卫星定位—研究
IV. ①P228.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第184434号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 16¼ 字数 351千字

2013年8月第2版第1次印刷 印数1—2500册 定价50.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

第2版前言

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 C⁴KISR 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、聚焦后勤”的作战目标,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 年针对我国的北斗卫星导航试验系统研究“北斗一号”双星定向定姿技术,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。在第一版的

基础上,结合最近几年相关的科研项目及成果,将原有内容进行增减及重新整合,全书内容分为三部分:第一部分概述篇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;第二部分原理与技术篇重点针对目前应用最为广泛的 GPS 全球定位系统,以及我国于 21 世纪初建成的北斗导航试验系统,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,系统介绍了其中的关键技术——载波相位模糊度确定技术,并结合当前发展趋势,详细介绍了 GPS 与惯导惯性导航系统的全组合导航技术,此外还深入分析了北斗导航试验系统定向精度;第三部分应用与实现篇介绍了卫星定向/低成本惯性全组合导航技术在军用及民用领域的两个成功应用案例——船载炮应用与车载移动卫星通信应用,并对基于我国第一代卫星导航定位系统——北斗导航试验系统无源定向技术进行了工程实现,实施了北斗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、主编。由吴美平、胡小平完成了概述篇的编写,吴美平、唐康华、何晓峰完成了“原理与技术”内容的编写,逯亮清、吴美平、胡小平、祝建成完成了“应用与实现”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,本书也适合作为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;在此对他们表示诚挚的感谢。

作者

2013 年 3 月

目 录

第一篇 概 述

第 1 章 卫星定向技术的发展	1
1.1 卫星定向技术起源	1
1.2 卫星定向技术发展历程	1
1.3 卫星定向关键技术及其发展	6
1.3.1 模糊度问题的本质	6
1.3.2 模糊度求解技术的发展	7
1.3.3 未来发展趋势	13
1.4 卫星定向技术的应用领域	13
1.4.1 卫星快速寻北技术	13
1.4.2 辅助惯导系统快速初始对准	14
1.4.3 变形监测	14
1.4.4 辅助炮兵阵地联测、战略导弹发射方位确定	14
1.4.5 卫星/INS 组合航向确定技术	15
参考文献	15

第二篇 原理与技术

第 2 章 卫星导航载波相位测量技术	21
2.1 载波相位测量数学模型	21
2.2 相对位置测量模型	26
2.2.1 单差相位观测量相对位置测量	26
2.2.2 双差观测量相对位置测量	30
2.2.3 三差观测量相对位置测量	31
2.3 载波相位测量误差分析	32
2.3.1 对流层折射	32
2.3.2 电离层折射	34

2.3.3	多路径效应	35
2.3.4	相对论效应	36
2.3.5	接收机时钟误差	38
2.3.6	轨道误差	39
2.3.7	天线相位中心偏差	39
	参考文献	39
第3章	卫星定向测姿原理	41
3.1	双天线定向原理及精度分析	41
3.1.1	基本原理	41
3.1.2	方向角求解	43
3.1.3	方向角精度	43
3.2	多天线测姿原理及精度分析	44
3.2.1	三天线测姿	44
3.2.2	四天线测姿	49
3.3	北斗导航试验系统定向原理	52
	参考文献	55
第4章	整周模糊度求解技术	56
4.1	引言	56
4.2	整周模糊度求解的一般流程	58
4.2.1	模糊度的估计	58
4.2.2	模糊度的搜索	63
4.2.3	模糊度的确认	77
4.3	基于多种约束模糊度搜索算法研究	78
4.3.1	已知基线长度对模糊度的约束作用	78
4.3.2	基线长度约束的几何解释	80
4.3.3	天线的特殊配置对模糊度的约束作用	82
4.3.4	姿态角对模糊度的约束作用	85
4.3.5	实验方法及结果	91
4.3.6	试验结果分析	94
4.4	基于双频接收机的模糊度求解	94
4.4.1	模糊度的组合	95
4.4.2	双频接收机的模糊度求解	97
4.5	基于惯性辅助的模糊度求解	100
4.5.1	惯性辅助 GNSS 定姿	100
4.5.2	惯性辅助 GNSS 模糊度求解	101
4.6	北斗试验系统定向模糊度求解	104

4.6.1	基于转动基线的双星定向模糊度确定方法	104
4.6.2	基于外部辅助信息的双星定向模糊度函数方法	122
	参考文献	127
第5章	GNSS/SINS 全组合导航技术	130
5.1	GNSS/SINS 全组合导航方案设计	130
5.1.1	全姿态 + 速度组合导航方案	130
5.1.2	偏航角 + 水平速度组合导航方案	131
5.1.3	硬件空间配置方案	132
5.2	GNSS/INS 全组合导航技术	133
5.2.1	GNSS/INS 全组合导航状态方程	133
5.2.2	GNSS/INS 全组合导航测量方程	136
5.3	基于惯导辅助的 GNSS 航向姿态参考系统	140
5.3.1	问题的提出	140
5.3.2	时间同步问题	141
5.3.3	惯导数据对姿态确定的辅助作用	142
5.3.4	试验验证	142
5.4	载波相位姿态确定技术在 SINS 动基座初始对准中的应用	143
5.4.1	问题的提出	143
5.4.2	卡尔曼滤波器的设计	144
5.4.3	仿真结果	146
5.5	基于惯导数据的周跳检测和修复	147
	参考文献	150
第6章	北斗试验系统定向精度分析	152
6.1	观测方程线性化分析	152
6.2	北斗定向精度线性化分析数学仿真	156
6.2.1	载波相位、基线长度测量精度对定向精度的影响	157
6.2.2	基线初始二维姿态对定向精度的影响	158
6.2.3	用户位置对定向精度的影响	158
6.2.4	基线长度与观测历元数对定向精度的影响	159
6.3	蒙特卡洛仿真分析	160
6.3.1	蒙特卡洛仿真目的	160
6.3.2	随机数、正态分布随机变量的生成及采样点数的确定	161
6.3.3	蒙特卡洛仿真结果及与线性化分析的对比	161
6.4	北斗定向误差特殊表现原因探析	163
6.5	本章小结	171
	参考文献	171

第三篇 应用与实现

第7章 GPS 定姿技术在武器系统中的应用	172
7.1 GPS 定姿在火炮火控系统中的应用	172
7.1.1 试验目的与原理	172
7.1.2 试验项目与步骤	173
7.1.3 试验内容与结果	173
7.1.4 试验结论	178
7.2 GPS 定向定姿在车载炮指挥控制系统中的应用	178
7.2.1 车载炮指挥控制系统原理概述	178
7.2.2 GPS 定姿在车载炮指挥控制系统目标侦察测量分系统中的应用	179
7.2.3 炮船(阵地船)的姿态确定:基于 GPS/SINS 确定舰船的姿态	184
参考文献	187
第8章 GPS 定向/IMU 组合技术在车载移动卫星通信中的应用	188
8.1 应用背景介绍	188
8.2 组合航姿系统	190
8.3 系统工作原理	192
8.4 关键技术	194
8.4.1 GPS 姿态信息相对 IMU 软件估计及补偿	194
8.4.2 水平姿态零速技术	197
8.4.3 GPS 速度航向辅助的动态模糊度初始化技术	198
8.5 系统标定技术	201
8.5.1 GPS 天线阵列与 IMU 相对关系标定	201
8.5.2 天线基座光编零位标定	202
8.6 本章小结	205
参考文献	205
第9章 北斗导航试验系统定向技术的实现	207
9.1 北斗定向系统组成	207
9.2 天线相位中心偏移标校实验	208
9.2.1 单天线瞬时相位中心漂移幅度标校	210
9.2.2 单天线稳定相位中心偏移标校	212
9.2.3 双天线稳定相位中心相对关系标校	215
9.3 北斗定向静态实验	217

9.3.1	静态重复精度测试	217
9.3.2	静态绝对精度测试	219
9.4	北斗定向车载动态实验	220
9.4.1	等效转动极大/极小值解模糊方法有效性验证	221
9.4.2	车载北斗实时定向精度验证	223
9.5	北斗定向实验精度分析	229
9.6	本章小结	230
	参考文献	230
附录 1	向量及其导数定义	232
A1.1	向量及向量导数	232
A1.2	单位向量求导(三维)	232
A1.3	向量叉乘之偏导	232
附录 2	北斗导航试验系统双星载波信号统计特性分析	234
A2.1	相关性分析	234
A2.2	正态性分析	241
A2.3	结论	248
	参考文献	249

第一篇 概述

第1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 20 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)^[1-5]。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。

20 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^[6-8],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,基站距离较近(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,Spinney^[9]1976 年在 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^[10]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^[11]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^[12]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^[13]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 0.5mil ~ 3mil^[14,15]。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 4.5mil,另外两套系统则分别为 7.38mil 和 12.10mil。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°。

Brown 与 Ward^[17]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 (1σ)、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°。Gilkey 等人^[18]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 1.14m) 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^[19] 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^[20] 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, 与其他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^[21] 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。Yuji Koura 与 Hiroya Suzuki^[22] 针对海上作业环境, 旨在开发一种精确的、相对低廉的适合于安装在小型渔船上的罗盘系统, 成功研制了一种低成本的双天线 GPS 罗盘, 设计了组合滤波器对 GPS 的定向信息与其它附加传感器(倾斜计、振动陀螺)的角度信息进行最优组合。该系统在日本、美国及欧洲的许多地方进行了长期的海上评估试验。定点测试选在建筑物顶部, 持续计算 24h, 航向角精度达到了 0.41°(RMS), 并成功通过 30°/s 的转弯速率测试。海上测试则是利用雷达成像来评估该 GPS 罗盘的性能, 但仅作参考之用而不能作定量评估。

Park 和 Kim 等人^[23] 对前述 GPS 罗盘系统定向精度的众多影响因素诸如接收机性能、基线配置、卫星几何等进行了分析, 提出了相对几何精度衰减因子 RGDOP (Relative Geometry Dilution Of Precision) 的概念及定义, 即基线矢量的协方差阵迹的平方根。主要的分析结论包括: ①方位角误差与(基线矢量)高度误差无关, 并随基线长度增加而降低; ②仰角误差与(基线矢量)北、天、东向误差均有关; ③基线长度(解算)误差不受长度影响。该文类比 GPS 诸多定位精度衰减因子的概念, 对于影响 GPS 定向精度的因素进行了详细分析, 并提出了 RGDOP 以及 HdDOP

(Heading Dilution Of Precision)、EIDOP (Elevation Dilution Of Precision)、BIDOP (Baseline Dilution Of Precision) 等概念,将影响因素划分为接收机性能(载波测相精度)与基线标称姿态及长度、卫星构形两大类,对于实际的工程应用具有重要的指导意义。

针对某些环境下 GPS 卫星观测受到很大影响的情况,诸如城市高层建筑、山地、树叶遮挡等,单纯利用 GPS 有时可能因卫星数目过少而导致无法定向,因此有的学者提出利用 GLONASS 系统对 GPS 定向进行增强的方案。JiunHan Keong 和 Lachapelle^[24]利用两个 GPS/GLONASS 接收机来确定航向与俯仰角。由于 GPS 采用 CDMA(Code Division Multiple Access)技术来区分不同卫星的信号,而 GLONASS 采用 FDMA(Frequency Division Multiple Access)体制,故不可能采用典型的双差观测测量,但利用单差观测测量又存在接收机钟差(时钟残余误差与线偏)的问题,因此他们引入了外部时频标准作为两个接收机的共同外部时间基准,剩余的时间与其他偏差用一个低通平均滤波器进行估计。利用 Ashtech 生产的两个 GPS/GLO-NASS GG24 接收机进行了静态及动态实验。静态实验应用 3m 基线在房顶上进行,以 10MHz 输出的铷钟作为共用的时间基准;车载动态实验则是利用 0.9m 基线,车速为 25km/h ~ 55km/h。实验结果表明,通过 GLONASS 的增强改善了模糊度解算的速度与可靠性,提高了定向系统的可用性,但精度方面并无显著提高。

应当指出的是,前述卫星定向方案都是至少利用了 4 颗 GPS(或 GPS + GLO-NASS)卫星,而讨论仅利用 2 颗卫星实现定向的文献较少。Sutton 提出了一种特殊的 4 天线非共面安装方式的 GPS 双星定姿方案^[25],前提是所有钟差已经得到检校,否则所需最少卫星数目将增至 3 颗。其创新之处在于,将在当地地理坐标系中表示的以基线矢量为目标参数的传统观测方程转化为在体坐标系中的以卫星视线单位矢量为目标参数的观测方程。尽管其模糊度解算成功率仿真结果非常乐观:采用单历元数据进行模糊度的搜索失败率小于 0.1%,但由于基线长度设置较短,仅 1.5 倍 L1 波长(即约 28.5cm),对于这样短的基线定姿精度将大打折扣。Conway 等人针对 Cohen^[26]所述基于运动的 GPS 模糊度参数确定方法存在要求非共面天线阵以及主从天线共视卫星不得少于 3 颗的限制,提出了一种基于运动的测姿模糊度求解新方法^[27]——伪全局迭代算法,可适用于卫星可见度差及基线共面的情况,并在直升机和飞机进行了成功地测姿试验验证。

20 世纪 90 年代中后期开始,国内部分院校及研究机构对卫星定姿定向技术及其应用进行了积极的探索与研究,取得了不少成果。由于长基线卫星定向可达到很高的精度,如采用百米长度基线,只要几分钟就可实现约千分之几度的方位确定精度,不少研究人员提出将卫星定向技术应用于导弹发射阵地的快速精密定向,并对相关技术进行了研究。陈金平等^[28]人利用 Ashtech X-I 型 GPS 接收机进行了基线长度分别为 100m、311.886m、317.372m 的快速定向实验,结果表明对短基线进行 3min ~ 5min 观测,可实现毫米级相对定位,满足一般工程及军事上快速定

向的需要。

帅平等^[29]人针对中远程弹道导弹高精度定位(米级)定向($10''$,约为 0.0028°)的要求,提出了联合卫星定位定向及全站式电子速测仪来实现导弹发射快速定位定向的方案。并指出,利用短基线(几十米左右)实现高精度卫星定向的重要因素在于天线相位中心的稳定性和抑制多路径效应的能力。应用2台 JAVAD GGD 双频20通道 GPS/GLONASS 接收机构成48m基线,连续采集24h,分别以5min、10min、15min、20min时段的数据进行定位及定向解算,得出的结论为:利用GPS/GLONASS组合系统,对于长度几十米的基线,15min内可满足定位精度为米级、定向精度为 $10''$ 左右的要求。需要指出的是,上述实验中采用的是 JAVAD 的 Regant 天线,其具有零相位中心、双频双深低多路径扼流圈天线专利技术,因此具有稳定的相位中心及一定的多路径抑制能力。

游振东等^[30]人也阐述了一种导弹发射阵地的标定方法,重点在于单点精密定位,同时也介绍了GPS定向技术,利用全站仪获取基线长度作为约束,累积多个历元的双差观测方程,将其线性化后组成误差方程组来求解基线向量,并分析了方位角中误差与基线长度、基线方位角及高度角的关系,最后给出了根据阵地(方位)标定指标而对基线长度要求的解析表达式(还与基线高度角及基线水平方向最大误差有关)。在已知点进行了30min静态试验,单点精密定位结果表明,三个坐标分量绝对误差在1m以内。定向试验精度为 $18.19''$,基线为23.12m。

在20世纪90年代末期,国内对利用载波测量输出的GPS接收板或整机进行了二次开发,构建了卫星定向系统。南京航空航天大学的胡国辉^[32]、范胜林^[33]采用Ashtech公司生产的两块GG24 OEM板、PC/104 586工控机等构成高精度GPS定位定向系统,方位精度达 0.052° (RMS);并针对地面运动车辆特点,充分利用基线长度和失锁前的姿态信息(短时间内姿态角变化不大),提出了一种失锁后的模糊度快速恢复算法。国防科技大学的王银华等^[34, 35]针对静态单基线情况,研究了GPS精密定向相关算法,利用自行编制的软件对Ashtech公司的ADU2定姿接收机所采集的载波相位数据进行了处理,试验表明,利用1m基线观测一个小时左右偏航角精度可达 0.01° 。逯亮清^[36]等人利用PC/104实现了GPS定位定向系统的小型化设计,试验表明,10min内2m固定基线模式定向精度为方位角 0.10° 、高低角 0.30° ,29.96m自由基线模式下方位角精度可达 0.0047° 、高低角 0.0040° 。刘根友、欧吉坤^[40]分析了三天线定姿系统的航向、纵滚(俯仰角)、横滚(滚动角)表达式,以及单历元定向、定姿精度,提出了静态情况下的平滑计算方案,利用JAVAD双频GPS接收机进行了静基线定姿定向试验,并采用动态数据处理方法,定姿中误差结果为航向 0.003° 、纵滚 0.007° 、横滚 0.027° (航向基线38.636m)。

随着20世纪90年代后期我国双星系统研制计划的推进,对基于地球静止双星的定向定姿技术的研究也相继起步,在系统未建成之前主要进行计算机仿真以及GPS仿双星实验研究。国防科技大学的郑伟^[41]、吴杰^[42]分别对应用两颗GPS

卫星、地球同步双星实现定姿的技术进行了研究,利用美国 Ashtech 公司生产的 ADU2 进行了 GPS 双星定姿试验。两人关于模糊度求解的基本思路都是基于 Mowafy^[43]所提出的长短基线法,只不过前者为普通的共线三天线结构,仅提供二维姿态;后者进行了一定改进,利用六天线形成两短两长基线的 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 十字形阵列。其中文献[43]为了进一步提高解模糊成功率,充分利用多个历元综合信息,提出了一种长短基线/序列优化组合的方法,经现场 GPS 试验验证成功率优于 90%,定姿精度优于 0.5° 。文献[42]在相位单差测量、基线长度及基线夹角测量精度分别为 2% 周、 0.001m 、 0.003rad 的情况下定姿精度仿真结果为偏航 0.23° 、俯仰 0.18° 、滚动 0.15° ,成功率为 98.3%。吴杰^[44]还进一步对长短基线法进行了较大改进,利用共线四天线双重长短基线配置,对单历元双星高精度定向技术进行了研究,并分析了影响实际定向精度的各种因素,其中各级基线长度分别为 1m 、 10m 、 100m ,由于最短基线也长于双星载波半波长,故采用指北针与垂直度盘(倾斜计)提供概略方位与俯仰信息,其仿真结果表明,采用 100m 基线可实现 0.004° (1σ) 的定向精度。

1.3 卫星定向关键技术及其发展

1.3.1 模糊度问题的本质

所有应用卫星载波相位进行精密测量的技术,诸如利用卫星载波相位实现定姿、定向、相对定位、变形监测、空间交会对接、编队飞行、大地测量中的 RTK (Real Time Kinematic) 技术等,都不可避免地涉及模糊度的确定问题。

模糊度 (Ambiguity) 指的是卫星载波相位观测量中的初始未知整数,单位为周,故常称为整周模糊度 (Integer Ambiguity)。模糊度问题的产生是由于接收机内部对载波相位观测的产生机理即重建载波的过程而导致的。

重建载波一般有两种方法:码相关法和平方方法。平方方法具有用户无需掌握测距码结构的优点,但无法获得卫星导航电文,不能独立进行定位解算,所以自 20 世纪 90 年代起无码接收机逐渐退出了国际市场,但无码测量技术仍用于测地型接收机^[45]。多数接收机采用码相关接收技术,可产生与测距码结构完全相同的本地码,重建载波的同时获得测距信号和卫星导航电文。重建载波后可得到载波相位观测量,理论上载波相位观测量是指卫星信号自卫星发射瞬时至用户接收瞬时,载波在星站路径上所传播的相位值。由于任一观测时刻的卫星载波相位值无法直接测量,因此采用接收机产生的参考载波相位与当前历元接收到的卫星载波相位求差的方法来实现。在实际中,基站之间存在相对视运动(即便地球静止卫星也是如此,不可能相对地球绝对静止),接收机所接收到的载波频率存在着多普勒频移,其与本机参考信号的频率是有差别的。实际的载波相位观测就是通过测定混

频后中频载波信号的相位值来获得接收机基准信号与接收到的载波信号的相位差,结果即所谓的单一卫星与接收机天线对之间的“原始载波相位观测量”。由于载波是一种单纯的正弦波,不带有任何识别标志,在锁定载波信号的瞬间,接收机内的多普勒计数器的初值是任意整数,并不反映真实的距离信息,只有载波相位观测值的小数部分是有意义的,而在随后的观测中,只要保持连续跟踪状态,则载波相位观测值将随星站相对运动而连续变化,也即锁定之后的所有载波相位观测之中均包含一个未知的整数偏差,该偏差即所谓的初始整周模糊度。只有确定了初始整周模糊度的正确值,才能得到反映星站几何距离的高精度相位观测信息。

1.3.2 模糊度求解技术的发展

随着利用卫星载波相位进行精密测量的应用日益广泛,历经二十多年的发展,卫星载波相位整周模糊度技术日趋成熟,各种模糊度求解的新方法与新理论层出不穷,呈现出了“百花齐放”、“百家争鸣”的局面。总的来讲,按照应用领域的不同,模糊度求解技术可划分为相对定位和定姿定向两大类,二者没有本质上的区别。但相对而言,后者存在以下若干主要特征:天线间距较短,一般不超过几十米,短的则不足 1m 甚至仅几厘米;天线相对关系固定;天线数目可根据需要进行增减,少则 2 个,多则 4~6 个甚至更多。因此,定姿定向中的约束关系较多,且差分相位测量中的卫星轨道误差、空间传播误差等未建模的残差影响更小,而这些误差在相对定位中的影响随基线长度的增加而增大(相对定位中基线长度往往以公里为计算单位),必要时需建立适当的模型以削弱其影响。在下面的阐述中并没有刻意区分不同的应用领域,而是按照载波相位模糊度技术总的发展历程对其进行概略描述。

1. 静态相对定位法

早期所采用的经典静态相对定位法是将整周未知数与其他未知参数(一般是用户坐标参数或坐标改正量)一起,在平差计算中一并求解。为了提高解的可靠性,需要较长的观测时间,视具体情况约需要 1h~3h 的观测时间。根据基线长度,对最终模糊度解算结果的处理又分为整数解和非整数解两种情况。由整周模糊度的物理意义,其应当具有整数特性,而平差解算时并未考虑该约束条件,也即平差的初步结果为浮点解。当基线较短时,由于大多误差(如卫星轨道误差、电离层延迟、对流层延迟等)的空间相关性较强,故观测模型中的未建模偏差幅值较小,可看作噪声的一部分,则此时平差后的模糊度浮点解比较接近整数,只要简单地将其取为最接近的整数即得到整数解。然而,当基线较长时,由于许多误差的空间相关性下降,观测模型中的残余偏差幅值增大,此时平差解算的整周模糊度精度较低,如果硬将其凑为整数,对于提高解的精度无益,此时宜保留浮点解的形式。经典静态相对定位法适用于对实时性要求不高的应用背景,如大地测绘等。到 1983 年,厘米级的静态相对定位已经成为一种常规技术。