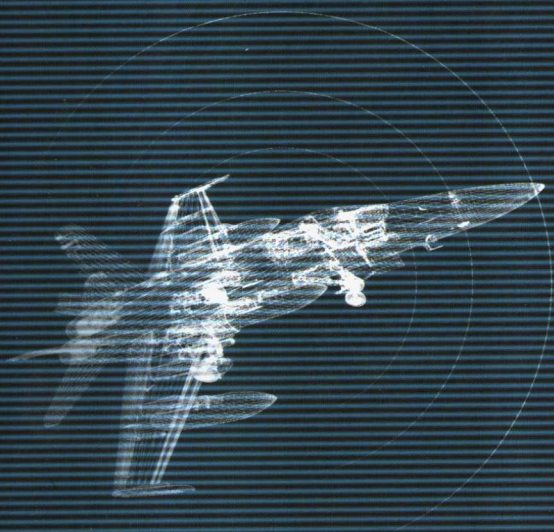


控制科学与工程



INS/SAR组合导航定位 技术与应用

高社生 李华星 著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

国防科工委「十五」规划专著

TN967.2

G170

TN967.2

G170



国防科工委“十五”规划专著

INS/SAR 组合导航定位技术与应用

高社生 李华星 著



西北工业大学出版社

北京理工大学出版社 北京航空航天大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

959282-86

内容简介

本著作是关于 INS/SAR 组合导航定位技术与应用的一部专著。书中针对当前世界导航技术的发展趋势及我国的实际情况,对 INS/SAR 组合导航系统进行了理论研究及工程应用探讨,比较全面、系统地介绍了导航定位和探测领域的理论知识和主要技术。全书共分 10 章。书中内容新颖,语言通俗,图文并茂,剪系统性强,技术与应用并重,理论与实践结合。

本著作适用于航空、航天、航海、交通等领域中从事导航定位工作与学习的广大教师、研究生、高年级本科生学习和参考,也可供从事国防建设的研究人员及工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

INS/SAR 组合导航定位技术与应用/高社生,李华星著. —西安:西北工业大学出版社,2004. 10

国防科工委“十五”规划专著

ISBN 7-5612-1768-4

I. I… II. ①高… ②李… III. 组合导航-定位-研究 IV. TN967.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 039488 号

INS/SAR 组合导航定位技术与应用

高社生 李华星 著

责任编辑 何格夫 责任校对 季苏平

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844

<http://www.nwpu.com>

西安新华印刷厂印制

各地书店经销

开本:850 mm×1 168 mm 1/32 印张:10.75 字数:265 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月第 1 次印刷 印数:1~3 000 册

ISBN 7-5612-1768-4 定价:24.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编 委：王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转



移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对



经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防



科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

雷达是用无线电波探测目标的利器,为了更好地发挥雷达的作用,人们一直在努力寻找提高雷达分辨率的新方法。随着信息论在雷达领域的应用、雷达信号分析和设计的发展、全息摄影技术的完善,这一目标终于得以实现,并导致分辨率很高的新型雷达——合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)——的诞生。合成孔径雷达是一种主动式微波成像雷达,它具有分辨率高、作用距离远、测绘带宽和全天候工作等优点,在国际雷达、遥感及众多学科领域已受到广泛关注,是目前研究的热点之一。近几十年来,合成孔径雷达无论在理论上,还是在技术上都在不断发展。在此基础之上,INS(Inertial Navigation System)/SAR 组合导航系统也出现并发展起来。

INS/ SAR 组合导航定位/探测系统是一个近年来发展起来、并引起人们广泛关注的新技术领域。国外已获得成功应用,前景诱人。在我国虽起步较晚,但发展很快。该组合导航系统是一种利用图像相关而获得高精度位置、方位修正的组合导航系统。高精度的 INS 对 SAR 的作用体现在:①运动补偿;②天线的稳定对准。反过来,SAR 所提供的精确位置信息又可用于校正惯性导航



系统随时间积累的误差,二者取长补短,构成一个理想的组合导航定位/探测系统。该组合导航系统具有精度高、自主性强、全天候工作、隐身性好、适用区域广等优点,有着广泛的应用前景。特别是在航空、航天导航和武器制导等方面,具有非常重要的作用,可作为目前军用较为适合而首选的导航系统。本著作就是为适应这些技术领域的需要而撰写的。

本著作针对当前世界导航技术的发展趋势及我国的实际情况,对 INS/SAR 组合导航系统进行了理论研究和工程应用探讨,比较全面、系统地介绍了导航定位和探测领域的基础知识和主要技术。全书共分十章。第一章为绪论,概述了导航系统的发展、导航的基本概念和导航系统的类型;第二章介绍了地球几何形状与重力场,以及各种垂线、纬度、高度的定义和常用坐标系;第三章论述了惯性导航的基本原理;第四章论述了合成孔径雷达的基本理论;第五章研究了 INS/SAR 组合导航系统的原理、特点、数学模型及应用;第六章研究 SAR 的运动补偿;第七章研究 INS 的误差修正;第八章研究 INS/SAR 组合导航系统中的图像匹配技术;第九章研究融合其他系统后的 INS/SAR 组合导航系统;第十章研究 INS/GPS/SAR 组合导航系统中的信息融合技术。

从导航系统的发展趋势和我国国防事业的发展要求来看,国防院校的广大青年学生和从事国防建设的广大科学技术人员急须掌握 INS/SAR 组合导航系统的专门



知识。《INS/SAR 组合导航定位技术与应用》正是基于这一需要而问世的。

本著作是在参阅了国内外大量文献资料,并吸收了作者近年来科研成果的基础上,加以系统整理、精心编著而成的。书中内容新颖,语言通俗,图文并茂,系统性强,技术与应用并重,理论与实践结合。本书适用于航空、航天、航海、交通等领域中从事导航定位工作与学习的广大教师、研究生、高年级本科生学习和参考,也可供从事国防建设的广大科学技术人员阅读、参考,希望能对他们提供有益的帮助。

本书第一、第四至第九章由高社生执笔,第二、第三、第十章由李华星执笔,全书由高社生统稿。

本书是国防科工委“十五”重点专著获准建设项目。在申报国防科工委“十五”重点专著建设项目立项过程中,得到了中国工程院冯培德院士的推荐和帮助。本书在撰写过程中,得到了西北工业大学自动化学院史忠科教授的关心和帮助。在此,作者向他们一并表示衷心的感谢。

作者特别感谢在西北工业大学攻读博士期间任思聪教授对自己的精心指导。

书中吸收了师弟邹维宝、师妹陈宇新博士论文中的部分研究成果,作者对他们表示衷心的感谢。

西北工业大学博士生周涛、张震龙、杨波,硕士生刘辉参加了本书的部分文字录入工作,作者在此向他们表



示衷心的感谢。

同时感谢西北工业大学出版社的领导和同志,正是由于他们的大力支持才保证了本著作按期高质量出版,作者向他们表示深深的感谢。

由于作者水平有限,缺点错误在所难免,如蒙读者指正,则本人幸甚,并深表感谢。

作 者

2004 年 5 月

于西北工业大学

英文缩写

BCD	Binary Coded Decimal Notation	十进制
CNS	Celestial Navigation System	天文导航系统
CRT	Cathode Ray Tube	阴极射线管
CCD	Charge Couple Device	电荷耦合器件
DMD	Digital Map Database	数字地图数据库
ECEF	Earth Centered Earth Fixed	地心地球固连
FDI	Failure Detection and Isolation	故障检测与隔离
FOV	Field of View	视场
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
INS	Inertial Navigation System	惯性导航系统
ISAR	Inverse Synthetic Aperture Radar	逆合成孔径雷达
IMU	Inertial Measurement Unit	惯性测量元件
ISLR	Integrated Side Lobe Ratio	积分旁瓣比
IRWR	Impulse Response Width Ratio	脉冲响应宽度比
LOS	Line of Sight	视线(瞄准线)
MOCO	Motion Compensation	运动补偿
NNF	Neural Network Filter	神经网络滤波器
PSLR	Peak Side Lobe Ratio	峰值旁瓣比
PCCS	Picture Collection Control System	摄影集中控制系统
PRF	Pulse Repetition Frequency	脉冲重复频率
RCM	Range Cell Migration	距离位移
RMS	Root Mean Square	均方根
SNR	Signal Noise Ratio	信噪比
SAR	Synthetic Aperture Radar	合成孔径雷达
S/DINS	Strap down Inertial Navigation System	捷联惯性导航系统
SARMCS	Synthetic Aperture Radar Motion	合成孔径雷达运动



	Compensation System	补偿系统
SC FT	Scaled Fourier Transform	离散傅里叶变换
STF	System Transfer Function	系统传递函数
S/D IMU	Strap down Inertial Measurement Unit	捷联惯性测量元件
TAN	Terrain Aided Navigation	地形辅助导航
TD	Time Difference	时间差

目 录

第一章 绪论

1.1 导航系统的发展	1
1.2 导航的基本概念	4
1.3 导航系统简介	7
1.4 小结	17

第二章 地球几何形状与重力场

2.1 地球的几何形状	19
2.2 地球的重力场	25
2.3 导航垂线、纬度及高度的定义	26
2.4 导航常用坐标系	29
2.5 小结	31

第三章 惯性导航的基本原理

3.1 概述	33
3.2 惯性导航的基本原理	34
3.3 惯性导航系统的基本结构	36
3.4 实现惯性导航要解决的几个问题	39
3.5 小结	42

第四章 合成孔径雷达的基本理论

4.1 合成孔径雷达的发展现状与研究方向	43
4.2 合成孔径雷达原理	55
4.3 合成孔径方式	77
4.4 合成孔径雷达的系统考虑	85
4.5 SAR 距离及距离率测量定位	95
4.6 小结	100

第五章 INS/SAR 组合导航系统

5.1 INS/SAR 组合导航系统的原理	101
-----------------------------	-----



5.2	INS/SAR 组合导航系统的数学模型	105
5.3	INS/SAR 组合导航系统的特点及应用	112
5.4	实现 INS/SAR 组合系统的关键技术与计算机仿真设计	114
5.5	小结	116
第六章 SAR 的运动补偿		
6.1	运动补偿的基本原理	118
6.2	SAR 运动补偿系统分析	123
6.3	运动补偿的因素及技术措施	143
6.4	运动补偿的运算操作过程	150
6.5	运动补偿的实现及其卡尔曼滤波器设计	154
6.6	小结	165
第七章 INS 的误差修正		
7.1	INS/SAR 组合导航系统观测量的获得	167
7.2	INS/SAR 组合导航系统中的滤波器	175
7.3	误差校正与故障检测	176
7.4	INS/SAR 组合导航系统对捷联惯性元件的要求	178
7.5	主 INS 和天线附加的 IMU 之间的传递对准	186
7.6	INS 误差对 SAR 图像质量参数的影响	191
7.7	小结	195
第八章 INS/SAR 组合导航系统中的图像匹配技术		
8.1	图像匹配方法研究	198
8.2	模拟退火边缘提取算法	210
8.3	位置-方向掩模的快速模板匹配方法	233
8.4	小结	249
第九章 INS/SAR 组合导航系统与其他系统的融合		
9.1	INS/GPS/SAR 组合导航系统	251
9.2	地形辅助的 INS/SAR 组合导航系统	265
9.3	INS/SAR/罗兰—C 组合导航系统	270
9.4	SAR/单轴稳定 S/DINS 组合导航系统	278
9.5	小结	283



第十章 INS/GPS/SAR 组合导航系统中的信息融合技术

10.1 多传感器信息融合理论概述	284
10.2 INS/GPS/SAR 组合导航系统中的分散融合估计算法	291
10.3 INS/GPS/SAR 组合导航系统中的全局最优融合估计 算法	294
10.4 联邦滤波算法在 INS/GPS/SAR 组合系统信息融合中 的应用	299
10.5 基于智能化信息融合技术的 INS/GPS/SAR 系统仿真 研究	310
10.6 小结	319
参考文献	320