



脉冲雷达跟踪测量数据 处理技术

胡绍林 许爱华 郭小红 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十五”统编教材

科研试验系列

脉冲雷达跟踪测量数据 处理技术

胡绍林 许爱华 郭小红 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

脉冲雷达跟踪测量数据处理技术 / 胡绍林, 许爱华,
郭小红著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 8
总装部队军事训练“十五”统编教材. 科研试验系列
ISBN 978 - 7 - 118 - 05241 - 1

I. 脉... II. ①胡...②许...③郭... III. 脉冲雷达—雷达
跟踪—测量系统—数据处理—教材 IV. TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 096994 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 6 $\frac{3}{4}$ 字数 178 千字

2007 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4500 册 定价 18.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

第三届总装备部军事训练教材 编辑工作委员会

主任委员 张建启

副主任委员 曹保榆 夏长法 侯贺华 郭文敏

委 员 (按姓氏笔画排序)

于俊民 王宜标 王泽民 尤广志

冯 章 朱双华 朱忠刚 刘树军

刘瑞成 安敏建 李方洲 李治三

肖力田 迟宝山 张忠华 张海东

陈永光 胡利民 侯 鹰 姜世忠

聂 皞 倪红星 徐 航 郭 勇

黄伟强 彭华良 裴承新 潘贤伦

秘 书 长 聂 皞

办公室主任 田 禾

办公室副主任 石根柱 郝 刚

办公室成员 李国华 李立法 郑晓娜

第三届总装备部军事训练教材 导弹航天测量控制系统编委会

主任委员 余同杰

副主任委员 张 渊

委 员 (按姓氏笔画排序)

孙宝升 杜小宁 杨再禹 张丽艳

周朝猛 施治元 康建勇 魏洪波

秘 书 石根柱

序

军事训练教材是部队开展军事训练和培养高素质科研试验与管理人才的重要基础。“十五”期间是我军加速武器装备现代化建设的关键时期,随着科学技术不断发展,新武器、新装备大量投入部队使用,急需编写相应的配套教材,来满足部队军事训练和人才培养的需求。为此,总装司令部印发了《总装部队军事训练教材建设“十五”计划》,并组织部分专家、学者编著了这套总装部队军事训练“十五”统编教材。

编著这套总装部队军事训练“十五”统编教材是国防科研试验事业继往开来的大事,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它以新时期军事战略方针为统揽,以军委和总装首长关于加强军事训练工作的一系列重要指示为指导,以《军事训练与考核大纲》、《继续教育科目指南》为依据,坚持科学性、前瞻性和实用性相结合,不断满足军事训练和人才培养对教材的需求,为圆满完成武器装备科研试验和管理保障任务提供了有力的技术支持。

“十五”统编教材共计 69 部,内容涉及科研试验、陆军装备科研订购、通用装备保障和试验后勤等 4 个系列的 28 个系统。这套教材既总结升华了武器装备科研试验和管理保障经验,又反映了国内外最新动态和发展方向,是对国防科研试验工程技术系列教材建设的进一步延续和扩展,是一批高质量的精品教材。其使用对象主要是部队具有大专以上学历的科技人员和管理干部,也可供院校有关专业师生使用或参考。

期望这套教材能够有益于部队高素质人才的培养,有益于武器装备科研试验和管理保障任务的完成,有益于国防科技事业的进步。

总装装备部军事训练教材

编辑工作委员会

二〇〇五年十二月

前 言

雷达跟踪测量与数据处理是一门涉及无线电测量、探索性数据分析、统计诊断、时间序列分析、随机信号处理、航天器运动学与动力学以及系统仿真、软件工程等多个学科知识综合运用的现代数据分析与处理技术。

本书以航天测控工程为背景,以脉冲雷达跟踪运载火箭主动段飞行过程为对象,在系统分析测量设备、跟踪环境、对象特性和运行过程复杂性的基础上,采用系统工程的一般理论与处理方法,从构建数学模型、制定处理方案、编制处理算法到优化处理结果的整个过程,建立了一套完整、实用的脉冲雷达跟踪测量与数据处理的方法、算法和对策。

全书由 11 章构成。第 1 章概论,初步规划了本书的研究对象和内容结构;第 2 章侧重介绍脉冲雷达跟踪测量与数据获取的一般原理和具体方法;第 3 章~第 6 章系统阐述了雷达测量数据主要误差源及误差处理方法;第 7 章探讨航天器弹道与轨道动力学建模问题;第 8 章~第 10 章系统地介绍了单台脉冲雷达数据处理与弹道/轨道确定技术、多台脉冲雷达联测数据融合处理技术,以及脉冲雷达多站联测最佳弹道自校准(EMBT)技术;第 11 章研究和建立了雷测数据与其他类型的测量信息的融合处理方法。

本书是作者及其所在单位系统总结最近 20 多年承担 40 多次大型航天试验任务外测数据处理的实战经验基础上完成的,书中不仅吸收了作者等人最近 10 多年先后完成的多项课题研究成果及 20 多篇公开发表的学术论文等学术技术成果,还适当地借鉴和吸收了国内外相关领域的最新研究成果。长时间雷达数据处理工作积累和相关研究成果确保了本书内容的系统性和方法的实用性,书中提供大量仿真示例也从一个侧面证实了书中各种处理方法的有效性和可靠性。

本书第 1 章由胡绍林撰写,第 2 章~第 5 章由许爱华、郭小红撰写,

第6章~第8章由胡绍林、郭小红撰写,第9章~第11章由胡绍林、郭小红、许爱华撰写。全书由胡绍林同志统稿。

本书编著工作得到总装备部军事训练教材编委会的大力支持,在此表示感谢。同时,特别感谢西安卫星测控中心各级领导与机关在本书编写过程中给予的指导和帮助,感谢国家自然科学基金重大研究计划项目(90305007)和江苏省科学基金项目(BK200620)的支持。

由于本书内容涉及面广泛,加之作者水平有限,难免有不妥或者错误之处,敬请读者指正。

编 者

2007年1月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 脉冲雷达在航天测控网中的作用	1
1.2 脉冲雷达跟踪测量与数据处理的研究内容	2
1.3 本书的体系结构和特色	4
第 2 章 脉冲雷达的跟踪测量与数据获取	6
2.1 雷达测量原理与实现技术	6
2.1.1 脉冲雷达的测距技术	6
2.1.2 测角原理与实现技术	11
2.1.3 测速原理与实现技术	12
2.2 脉冲雷达的数据获取与格式转换	14
2.2.1 几种典型脉冲雷达的测量数据记录格式	14
2.2.2 脉冲雷达测量数据的量纲复原	17
2.3 雷达数据预处理接口子系统设计与实现	18
第 3 章 雷测数据的误差源分析与数学建模	20
3.1 误差分类与误差处理的典型方法	20
3.2 雷测数据的误差源	22
3.2.1 测距误差	22
3.2.2 测角误差	24
3.2.3 测速误差	26
3.3 雷测数据系统误差的数学建模	27
3.3.1 设备系统误差的数学模型	28
3.3.2 过程误差的数学模型	28
3.4 随机误差的数学建模	29

3.5	过失误差与野值点数据的数学建模	30
3.5.1	野值点的定义与成因分析	31
3.5.2	野值点的分类	32
3.5.3	野值点的模型描述	32
3.6	雷测数据设备系统误差修正的应用	34
第4章	雷达跟踪过程的误差修正	36
4.1	电波折射误差的分层实测修正	36
4.1.1	折射误差基本模型	36
4.1.2	折射误差修正的球形分层假定与计算方法	37
4.1.3	应用实例	38
4.2	电波折射误差的经验—分层修正	40
4.2.1	电波折射指数经验公式修正	40
4.2.2	仰角数据折射经验—分层修正	41
4.2.3	测距数据折射经验—分层修正	42
4.2.4	经验—分层修正方法的仿真	42
4.3	雷达测量数据时间误差的修正	46
4.4	跟踪部位修正算法	47
第5章	雷测数据随机误差的滑动平滑技术	49
5.1	数据平滑技术概论	49
5.2	滑动多项式平滑与稳健平滑	50
5.3	线性最优正交多项式滑动平滑	52
5.4	双重中值容错平滑算法	53
5.4.1	平滑算法的设计	54
5.4.2	无异常数据情况下平滑效果的仿真分析	55
5.4.3	含异常数据情况下平滑算法的容错能力分析	57
第6章	雷测数据野值点的检测与修复	60
6.1	野值点差分检测法	60
6.2	野值点拟合外推检测法	62
6.3	野值点的管道检测法	63
6.4	无需建模的容错平滑器检测法	64

6.4.1	容错平滑器检测算法	64
6.4.2	野值点修复算法	65
6.4.3	应用实例	66
6.5	雷测数据误差分析与处理子系统设计与实现	67
第7章	航天器弹道与轨道动力学建模	69
7.1	航天器外测弹道与轨道	69
7.1.1	弹道参数的含义	70
7.1.2	轨道参数的含义	71
7.2	二体问题与 Kepler 方程	73
7.3	运载火箭弹道动力学建模	76
7.3.1	起飞段力学模型	76
7.3.2	引导飞行段力学模型	77
7.3.3	滑行段力学模型	78
7.3.4	运载火箭主动段状态演化方程	78
7.4	航天器轨道动力学建模	80
7.4.1	航天器质心运动的受力分析	80
7.4.2	航天器质心运动的状态演化方程	83
7.5	航天器主动段弹道仿真	87
第8章	弹道与轨道的单站确定技术	90
8.1	常用坐标系及转换关系	90
8.1.1	参考椭球与大地测量成果	90
8.1.2	大地测量与天文测量中几个基本概念	91
8.1.3	常用坐标系的定义	91
8.1.4	常用坐标系之间的转换	93
8.2	数值微分与数值积分	96
8.2.1	数值微分技术	96
8.2.2	数值积分技术	100
8.3	单台雷达测量数据弹道确定算法	101
8.3.1	定位算法	101
8.3.2	速度分量算法	102

8.3.3 其他弹道参数的求解算法	103
8.3.4 弹道精度分析	104
8.4 单台雷达测量数据轨道确定算法	107
8.4.1 单点($r_0, \dot{r}_0$)定初轨算法	107
8.4.2 两点测量数据定初轨算法	110
8.5 单站确定技术在航天工程中应用	117
第9章 多台雷达联测数据融合处理技术及应用	120
9.1 线性模型最小二乘统计推断	120
9.2 多台雷达联测 LS 确定弹道的处理逻辑和算法	122
9.2.1 处理逻辑	122
9.2.2 目标位置的初值预解	122
9.2.3 多站数据融合处理算法	123
9.2.4 多站数据融合的弹道精度	125
9.3 多台雷达测距与距离变化率数据弹/轨道确定算法	127
9.3.1 3R 定位算法	127
9.3.2 3 $\dot{R}$ 求解目标速度分量	132
9.4 应用效果情况分析	135
第10章 脉冲雷达多站联测 EMBET 技术及其应用	140
10.1 多站联测定位模型及其线性化技术	140
10.2 多站联测定位自校准模型的 LS 估计	143
10.3 多站联测定位自校准模型的递推 LS 估计	146
10.3.1 定理1的证明过程	147
10.3.2 递推算法的特点分析	156
10.4 基于 ARMA 模型的改进型 EMBET 算法	157
10.4.1 模型参数的两段 RELS 估计	158
10.4.2 噪声特性的自适应估计	160
10.5 基于样条逼近的改进型 EMBET 算法	161
10.6 仿真计算与结果分析	163
第11章 脉冲雷达与其他信息的融合处理	167
11.1 数据比对分析与残差分析方法	167

11.1.1	常用的数据比对算法	167
11.1.2	比对残差的统计分析	173
11.1.3	应用实例分析	176
11.2	雷测数据与其他外测数据的融合处理	178
11.2.1	外弹道参数的 B 样条函数模型	178
11.2.2	真实参数的线性化模型	179
11.2.3	多测量设备联合模型	180
11.2.4	非线性融合方法	181
11.3	雷测与遥测数据的融合处理技术	182
11.3.1	制导工具系统误差模型	182
11.3.2	遥测系统误差样条函数模型	184
11.3.3	外测系统误差样条函数模型	186
参考文献		189

第 1 章 概 论

雷达(Radio Detecting & Ranging,Radar),含义是无线电探测和测距。更直观地说,雷达是采用无线电波发现目标,并测定其在空间位置及变化的无线电测量设备^[1]。

自 1888 年德国物理学家 Heinrich Hertz 验证电磁波产生、接收和目标散射等雷达工作的最基本原理至今近 120 年时间里,雷达在军事和民用领域得到迅速发展和广泛使用。本书将从航天工程应用的角度,阐述脉冲雷达跟踪测量原理和高精度雷达数据处理技术。

1.1 脉冲雷达在航天测控网中的作用

所谓航天测控网(Space Tracking, Telemetry and Command Network)^[2]是指对运载火箭、航天器进行跟踪、测量、监视、控制和指挥的综合系统,它通常是由航天指挥控制中心、测控站(包括陆基测控站、测量船、测量飞机、跟踪与中继卫星)及通信网组成。

雷达是航天测控网的支柱性设备,对航天器的测控工作发挥着极其重要的作用。目前,我国航天测控网装备有脉冲雷达、连续波雷达、微波统一测控系统等近 10 种不同类型的无线电测量设备。

雷达有多种类型和分类方法。按功能分有警戒雷达、引导雷达、测高雷达、制导雷达、火控雷达、成像雷达和气象雷达等;按无线电波波长分,有米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达、毫米波雷达、激光/红外雷达等;按工作体制分,有圆锥扫描雷达、单脉冲雷达、相控阵雷达、频率捷变雷达、频率分集雷达、合成孔径雷达等^[3]。其中,脉冲雷达因其可单站使用,机动性强,在测控领域应用非常广泛。

考虑到脉冲雷达在航天测控网中的重要性,也考虑到微波统一系统等新型号设备测量元素与脉冲雷达的相似性,本书以我国航天测控网典型脉冲雷达系统为研究对象。事实上,在我国现有的航天测控网中,无论是主动段、运行段还是回收段,脉冲雷达都有重要作用^[4]。例如,在运载火箭飞行段,脉冲雷达可利用目标对电磁波的反射现象发现目标,地面测控系统从目标回波中提取信息,测定目标相对于雷达的距离、角度和距离变化率,以及其他的一些目标的特征信息^[5],并测定其位置。

利用上述跟踪测量信息,结合适当的数学模型、数据分析方法和数据处理技术,可以确定目标在三维空间中的位置、速度、加速度,以及弹道倾角、弹道偏角等弹/轨道重要参数。又如,在航天器入轨段(包括运载工具的主动段),脉冲雷达可以获取航天器的运动参数,以监视其飞行状态并确定其初轨,为正确实施轨道控制提供保障;在目标返回段,脉冲雷达的测量数据更是直接用于返回轨道测定和预报落点。

脉冲雷达不仅可以单站跟踪,还可以十分灵活方便地与其他设备结合,进行组合跟踪,构成航天器多站测量系统,形成中、高精度的联合测量带,用于战略武器(如导弹)飞行试验和实战任务的首区、落区测量,在航空、航天等军事与民用领域中有着极其重要的作用。

1.2 脉冲雷达跟踪测量与数据处理的研究内容

雷达数据处理的目的是利用测量元素,采用适当的数学模型、数学方法、数据处理算法和误差分析技术,甄别和修复异常数据、修正各种类型系统误差、消除或尽可能削弱随机误差的影响,确定航天器在跟踪弧段内任意时刻的位置参数 $(x(t), y(t), z(t))$ 、速度参数 $(\dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{z}(t))$ 、加速度参数 $(\ddot{x}(t), \ddot{y}(t), \ddot{z}(t))$ 以及弹道倾角 $\theta(t)$ 、弹道偏角 $\sigma(t)$ 、合速度 $v(t)$ 、切向加速度 $\dot{v}(t)$ 、法向加速度 $v\dot{\theta}(t)$ 和侧向加速度 $v\dot{\sigma}(t)$ 等。弹/轨道参数不仅是航天器主动段安全控制和返回段状态监视的重要依据,而且在航天故障的分析、制导系统误差分离、制导精度鉴定、运载工具改进与定型等工作中有着极其重要的作用。

跟踪测量与数据处理是一项复杂系统工程。由于测量设备的复杂性、跟踪环境的复杂性和目标特性及运行过程的复杂性,从制定处理方案、构建数学模型、编制处理算法到优化处理结果的整个过程中,必须严格地遵循系统工程的一般理论与处理方法。

雷达跟踪测量与数据处理技术,包括跟踪测量与数据获取技术、数据诊断与误差分析技术、数学建模与处理技术,以及数值微分与弹道计算技术等。其中,最为核心的技术是误差分析与数据融合高精度处理,因为雷达系统在信号传播、跟踪测量、数据采样等环节中不可避免地会引入误差,如设备固有偏差、设备轴系误差、电波折射误差、时延误差、设备噪声、环境扰动、随机误差、过失误差等。如何分析和处理误差贯穿到雷达数据处理整个过程,处理技术的先进与否,直接影响到弹/轨道计算的精度。

通常,不同类型误差的处理方法是不一样的。例如,系统误差必须依据产生误差的环节和机理,建立系统误差数学模型并利用标校结果进行修正或从采样数据中扣除;随机误差的典型处理方法是滤波、平滑或利用冗余信息进行平差,随机误差的表现形式和统计特性将直接影响所采用的处理算法及其处理效果,影响弹道计算精度与结果的可信度;过失误差属于对弹道计算有破坏性影响的、可导致算法崩溃和计算结果失真的强影响类误差,现有处理方法包括修复和容错两大类^[6]。大量的数据处理实践证实,采用不同方法获得处理结果的精度和可靠性是不一样的。

鉴于此,研究高精度数据处理技术,首先必须研究测量误差的分析与处理技术。一般地,测量数据的误差分析与处理技术的研究内容,至少包括如下几个重要方面:一是误差的模型表示与模型分析技术,建立合适的误差表示模型、误差影响关系模型和误差评估模型,并对模型结构及其可靠性进行统计检验,检验模型的紧致性、随机误差的平稳性与相关性、过失误差的 AO(Additive Outliers)性和 IO(Innovations Outliers)性等;二是模型参数的统计判决技术,采用数理统计的理论和方法,确定模型参数的最优点估计或区间估计,或对设备系统误差系数的标校结果或分布规律进行假设检验;三是统计诊断技术,包括平稳序列、非平稳序列动态测量数据的孤立野值点检测、野值斑点的统计检测与修复技术;四是稳健处理技术,改进最小二乘(LS)等经典处理算法的稳健性,建立对模型误差、数

据扰动具有稳健-抗扰性的新型处理算法;五是容错技术,建立各种对异常数据具有容错能力和抗野值干扰能力的容错算法,例如,容错数值滤波、容错平滑与容错微分平滑技术等;六是残差分析技术,包括残差影响分析、灵敏度分析、数据校准技术等。

总之,测量误差分析与处理技术,是雷达数据处理技术的核心,它贯穿雷达数据处理全过程,也将体现在本书的各个章节和算法研究与实现的各环节。

1.3 本书的体系结构和特色

雷达数据处理是一门以数字计算机为工具的,涉及无线电测量、数理统计、时间序列分析、统计诊断、随机过程、信号处理、航天器运动学与动力学、计算方法以及系统仿真、软件工程等多个学科知识综合运用的现代数据分析与处理技术。

本书侧重探讨脉冲雷达的跟踪测量与数据处理技术,以雷达跟踪运载火箭主动段飞行过程为对象,结合作者所在单位最近 20 多年承担大型航天试验任务的实战经验,吸收作者等人近 10 多年来相关领域的研究成果,以及国内外相关领域的成果,建立起一套方法完整、可操作性强、技术先进的雷达测量数据获取与处理技术。

本书由 11 章构成。其中,第 2 章简要介绍了脉冲雷达跟踪测量与数据获取的一般原理和具体方法;第 3 章以脉冲雷达的跟踪测量过程为研究对象,分析了雷达测量数据主要误差源、误差类型和不同类型误差分量的数学建模方法,并给出了几种典型的误差模型形式;第 4 章重点讨论系统误差修正问题,分别以设备系统误差和跟踪过程引入误差为对象,建立了设备系统误差的设备标校与修复算法,以及脉冲雷达在跟踪航天器过程中不同环境条件下的环境误差和过程误差的修正算法;第 5 章讨论随机误差的平滑与处理技术,建立了多组能够满足不同计算精度要求的数据平滑方法;第 6 章讨论雷测数据中过失误差处理方法,建立了可进行单个野值和野值斑点的数据的检测、诊断和修复算法;第 7 章侧重探讨航天器的弹道与轨道动力学建模问题,给出了航天器动力飞行段和轨道运行