



国防科技图书出版基金

# Velocity Tracking Measurement Data Processing

## 测速跟踪测量数据处理

崔书华 王敏 王佳 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

# 测速跟踪测量数据处理

Velocity Tracking Measurement  
Data Processing

崔书华 王敏 王佳 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

测速跟踪测量数据处理/崔书华,王敏,王佳著.

—北京:国防工业出版社,2017.8

ISBN 978-7-118-11258-0

I. ①测… II. ①崔… ②王… ③王… III. ①外弹道  
试验—数据处理 IV. ①TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 170553 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 12½ 字数 238 千字

2017 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 65.00 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

## 致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金

## 第七届评审委员会组成人员

|           |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 主任委员      | 潘银喜 |     |     |     |
| 副主任委员     | 吴有生 | 傅兴男 | 赵伯桥 |     |
| 秘书长       | 赵伯桥 |     |     |     |
| 副秘书长      | 邢海鹰 | 谢晓阳 |     |     |
| 委员        | 才鸿年 | 马伟明 | 王小谟 | 王群书 |
| (按姓氏笔画排序) | 甘茂治 | 甘晓华 | 卢秉恒 | 巩水利 |
|           | 刘泽金 | 孙秀冬 | 芮筱亭 | 李言荣 |
|           | 李德仁 | 李德毅 | 杨伟  | 肖志力 |
|           | 吴宏鑫 | 张文栋 | 张信威 | 陆军  |
|           | 陈良惠 | 房建成 | 赵万生 | 赵凤起 |
|           | 郭云飞 | 唐志共 | 陶西平 | 韩祖南 |
|           | 傅惠民 | 魏炳波 |     |     |

# 前言

测速跟踪测量设备是航天测控网的重要组成部分,在导弹、运载火箭和空间探测等领域中发挥着其他测量设备难以替代的作用。本书著者长期承担我国航天测速跟踪测量数据处理任务,从跟踪测量数据复原到外弹道数据参数最优估计计算,积累了丰富的数据处理经验,取得了10多项科技成果。著者结合最近20年承担近百次大型航天试验任务外测数据处理的实战经验,在吸收著者等人相关研究成果的基础上编写了本书。

本书在保证技术先进性的同时,紧密结合工程实际,充分考虑了测控工程领域测速跟踪测量技术的发展趋势,内容充实,针对性和适用性强。

全书共分8章。第1章概论,由王敏、王佳和崔书华撰写;第2章测量数据预处理,由崔书华和王佳撰写;第3章短基线干涉仪误差修正及误差影响分析,由王敏和王佳撰写;第4章多测速系统误差修正及误差影响分析,由崔书华和王佳撰写;第5章数据质量检查与评估,由崔书华和王敏编写;第6章短基线干涉仪测量数据弹道确定,由王敏和王佳撰写;第7章多测速测量数据弹道确定及评估,由崔书华和王佳撰写;第8章测速系统与其他测量系统数据融合,由崔书华撰写。

本书编写工作得到了西安卫星测控中心杨开忠研究员、张荣之研究员、杨永安研究员、王家松研究员的支持和指导,航天器在轨故障诊断与维修重点实验室副主任胡绍林研究员和北京航空航天大学自动化学院秦世引教授对本书进行了认真审核并提出建议,西安卫星测控中心高级工程师宋卫红、刘军虎及硕士研究生李果参与了本书的相关工作,在此一并表示感谢。同时,本书得到了国防科技图书出版基金以及国家自然科学基金(61473222,61231018,41274018)的资助,宇航动力学国家重点实验室主任李恒年研究员、办公室杜卫兵主任对相关研究工作也提供了大力支持。

由于本书内容涉及面广,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。

著者  
2017年1月

# 目录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第1章 概论 .....                | 001 |
| 1.1 测速系统在航天测控网中的作用 .....    | 002 |
| 1.2 国内外测速测量发展现状 .....       | 003 |
| 1.2.1 国外发展现状 .....          | 003 |
| 1.2.2 国内发展情况 .....          | 006 |
| 1.3 测速跟踪测量数据处理若干关键技术 .....  | 008 |
| 参考文献 .....                  | 010 |
| 第2章 测量数据预处理 .....           | 012 |
| 2.1 坐标系统与坐标转换 .....         | 012 |
| 2.2 数据格式及复原 .....           | 014 |
| 2.2.1 短基线干涉仪测量数据格式及复原 ..... | 014 |
| 2.2.2 多测速测量数据格式及复原 .....    | 015 |
| 2.3 测量数据遴选 .....            | 016 |
| 2.3.1 单个测量数据遴选 .....        | 017 |
| 2.3.2 多个测量数据遴选 .....        | 017 |
| 2.3.3 基于残差准则的测量数据遴选 .....   | 018 |
| 2.3.4 基于弹道参数的测量数据遴选 .....   | 019 |
| 2.4 野值剔除与修复 .....           | 020 |
| 2.4.1 离散单点异常识别与修复 .....     | 020 |
| 2.4.2 斑点识别与修复 .....         | 021 |
| 2.4.3 实例分析 .....            | 023 |
| 2.5 滤波与平滑 .....             | 026 |
| 2.5.1 滤波方法 .....            | 027 |
| 2.5.2 滤波算法设计 .....          | 027 |
| 2.5.3 算法评价指标 .....          | 028 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 2.5.4 实例分析 .....                   | 030        |
| 参考文献 .....                         | 032        |
| <b>第3章 短基线干涉仪误差修正及误差影响分析 .....</b> | <b>034</b> |
| 3.1 短基线干涉仪测量系统简介 .....             | 034        |
| 3.1.1 系统工作原理 .....                 | 034        |
| 3.1.2 系统组成及功能 .....                | 036        |
| 3.1.3 主要技术性能 .....                 | 039        |
| 3.2 误差修正 .....                     | 039        |
| 3.2.1 时间不一致误差修正 .....              | 039        |
| 3.2.2 电波折射误差修正 .....               | 040        |
| 3.2.3 基线传输时延误差修正 .....             | 043        |
| 3.2.4 跟踪部位修正 .....                 | 044        |
| 3.3 误差影响分析 .....                   | 045        |
| 3.3.1 系统误差对测速的影响 .....             | 045        |
| 3.3.2 随机误差对测速的影响 .....             | 048        |
| 参考文献 .....                         | 060        |
| <b>第4章 多测速系统误差修正及误差影响分析 .....</b>  | <b>061</b> |
| 4.1 多测速测量系统简介 .....                | 061        |
| 4.1.1 系统工作原理 .....                 | 061        |
| 4.1.2 系统组成及功能 .....                | 062        |
| 4.1.3 主要技术性能 .....                 | 065        |
| 4.2 误差修正 .....                     | 066        |
| 4.2.1 时间误差修正 .....                 | 066        |
| 4.2.2 电波折射误差修正 .....               | 066        |
| 4.2.3 跟踪部位修正 .....                 | 067        |
| 4.2.4 其他误差 .....                   | 067        |
| 4.3 误差影响分析 .....                   | 068        |
| 4.3.1 时间插值影响分析 .....               | 068        |
| 4.3.2 多普勒频率误差影响分析 .....            | 072        |
| 4.3.3 模型误差影响分析 .....               | 077        |
| 参考文献 .....                         | 082        |
| <b>第5章 数据质量检查与评估 .....</b>         | <b>083</b> |
| 5.1 随机误差特性分析 .....                 | 083        |
| 5.1.1 最小二乘残差统计法 .....              | 083        |

|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 5.1.2 | 自回归残差统计法 .....       | 084 |
| 5.1.3 | 容错残差统计法 .....        | 086 |
| 5.2   | 数据拟合优度分析 .....       | 087 |
| 5.2.1 | 问题的提出 .....          | 087 |
| 5.2.2 | 方法介绍 .....           | 088 |
| 5.2.3 | 实例分析 .....           | 089 |
| 5.2.4 | 结论 .....             | 092 |
| 5.3   | 数据比对分析法 .....        | 092 |
| 5.3.1 | 反算比对 .....           | 093 |
| 5.3.2 | 结果比对 .....           | 099 |
| 5.3.3 | 趋势项分析 .....          | 101 |
|       | 参考文献 .....           | 103 |
| 第6章   | 短基线干涉仪测量数据弹道确定 ..... | 104 |
| 6.1   | 联测数据处理 .....         | 104 |
| 6.1.1 | 处理方法 .....           | 104 |
| 6.1.2 | 应用效果 .....           | 106 |
| 6.1.3 | 结论 .....             | 111 |
| 6.2   | 短基线干涉仪自定位技术 .....    | 112 |
| 6.2.1 | 处理方法 .....           | 112 |
| 6.2.2 | 相关问题处理方法 .....       | 114 |
| 6.2.3 | 应用效果 .....           | 115 |
| 6.2.4 | 结论 .....             | 116 |
| 6.3   | 短基线干涉仪测角数据处理技术 ..... | 116 |
| 6.3.1 | 处理方法 .....           | 116 |
| 6.3.2 | 应用效果 .....           | 118 |
| 6.3.3 | 结论 .....             | 120 |
|       | 参考文献 .....           | 120 |
| 第7章   | 多测速测量数据弹道确定及评估 ..... | 121 |
| 7.1   | 一主多副计算方法 .....       | 121 |
| 7.1.1 | 线性差分法 .....          | 122 |
| 7.1.2 | 最优估计法 .....          | 125 |
| 7.2   | 两主多副计算方法 .....       | 129 |
| 7.2.1 | 拟牛顿法 .....           | 130 |

|                           |                              |     |
|---------------------------|------------------------------|-----|
| 7.2.2                     | 非线性差分法 .....                 | 134 |
| 7.2.3                     | 最小二乘改进法 .....                | 139 |
| 7.2.4                     | 样条约束法 .....                  | 144 |
| 7.3                       | 布站结构的影响分析与评估 .....           | 148 |
| 7.3.1                     | 仿真数据的获取 .....                | 148 |
| 7.3.2                     | 数据处理精度分析 .....               | 149 |
| 7.3.3                     | 精度几何因子分析 .....               | 150 |
| 7.3.4                     | 目标至主、副站的夹角对目标参数精度影响 .....    | 150 |
| 7.3.5                     | 基线对目标参数精度影响 .....            | 150 |
| 7.3.6                     | 测站布站分析实例 .....               | 151 |
| 7.3.7                     | 结论 .....                     | 153 |
|                           | 参考文献 .....                   | 153 |
| 第8章 测速系统与其他测量系统数据融合 ..... |                              | 155 |
| 8.1                       | 多测速系统与光学测量系统测量数据融合 .....     | 155 |
| 8.1.1                     | 光学测量数据简介 .....               | 155 |
| 8.1.2                     | 数据融合模型 .....                 | 156 |
| 8.2                       | 多测速系统与GNSS系统测量数据融合 .....     | 157 |
| 8.2.1                     | GNSS测量数据简介 .....             | 157 |
| 8.2.2                     | 统一坐标系 .....                  | 158 |
| 8.2.3                     | 目标参数解算方法 .....               | 159 |
| 8.2.4                     | 实例分析 .....                   | 161 |
| 8.3                       | 多测速系统与无线电测量距离变化率测元数据融合 ..... | 163 |
| 8.3.1                     | 无线电测量距离变化率测元简介 .....         | 163 |
| 8.3.2                     | 处理方法 .....                   | 163 |
| 8.3.3                     | 实例分析 .....                   | 166 |
| 8.4                       | 短基线干涉仪与其他信息的数据融合 .....       | 167 |
| 8.4.1                     | 数据融合模型 .....                 | 167 |
| 8.4.2                     | 实例分析 .....                   | 170 |
| 8.4.3                     | 结论 .....                     | 172 |
|                           | 参考文献 .....                   | 172 |

# Contents

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Chapter 1 Overview .....                                                              | 001 |
| 1.1 The Function of Velocity Measurement System in<br>Space TT&C Network .....        | 002 |
| 1.2 Development Status of Velocity Measurement at Home and Abroad ...                 | 003 |
| 1.2.1 Foreign Development Status .....                                                | 003 |
| 1.2.2 Domestic Development Situation .....                                            | 006 |
| 1.3 Several Key Technologies of Data Processing for<br>Velocity Measurement .....     | 008 |
| References .....                                                                      | 010 |
| Chapter 2 Measurement Data Preprocessing .....                                        | 012 |
| 2.1 Coordinate System and Conversion .....                                            | 012 |
| 2.2 Data Format and Recovery .....                                                    | 014 |
| 2.2.1 The Short Baseline Interferometer Measurement<br>Data Format and Recovery ..... | 014 |
| 2.2.2 Multi Velocity Measurement Data Format and Recovery .....                       | 015 |
| 2.3 Measurement Data Selection .....                                                  | 016 |
| 2.3.1 Single Measurement Data Selection .....                                         | 017 |
| 2.3.2 Multi Measurement Data Selection .....                                          | 017 |
| 2.3.3 Measurement Data Based on<br>Residual Criterion .....                           | 018 |
| 2.3.4 Measurement Data Based on<br>Ballistic Parameters .....                         | 019 |
| 2.4 Outliers Removal and Repair .....                                                 | 020 |
| 2.4.1 Discrete Single Point Anomaly Recognition and Repair .....                      | 020 |
| 2.4.2 Spot Outliers Recognition and Repair .....                                      | 021 |
| 2.4.3 Case Analysis .....                                                             | 023 |
| 2.5 Filtering and Smoothing .....                                                     | 026 |
| 2.5.1 Filtering Method .....                                                          | 027 |
| 2.5.2 Filtering Algorithm Design .....                                                | 027 |
| 2.5.3 Algorithm Evaluation Index .....                                                | 028 |
| 2.5.4 Case Analysis .....                                                             | 030 |

|                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| References .....                                                                                    | 032        |
| <b>Chapter 3 Error Correction and Error Analysis of Short<br/>Baseline Interferometer .....</b>     | <b>034</b> |
| 3.1 Introduction to Measurement System of Short<br>Baseline Interferometer .....                    | 034        |
| 3.1.1 System Working Principle .....                                                                | 034        |
| 3.1.2 System Composition and Function .....                                                         | 036        |
| 3.1.3 Main Technical Performance .....                                                              | 039        |
| 3.2 Error Correction .....                                                                          | 039        |
| 3.2.1 Time Inconsistency Error Correction .....                                                     | 039        |
| 3.2.2 Radio Wave Refraction Error Correction .....                                                  | 040        |
| 3.2.3 Baseline Transmission Delay Error Correction .....                                            | 043        |
| 3.2.4 Tracking Position Correction .....                                                            | 044        |
| 3.3 Error Influence Analysis .....                                                                  | 045        |
| 3.3.1 The Influence of System Error on Velocity Measurement .....                                   | 045        |
| 3.3.2 The Influence of Random Error on Velocity Measurement .....                                   | 048        |
| References .....                                                                                    | 060        |
| <b>Chapter 4 Error Correction and Error Analysis of Multi Velocity<br/>Measurement System .....</b> | <b>061</b> |
| 4.1 Introduction to Multi Velocity Measurement System .....                                         | 061        |
| 4.1.1 System Working Principle .....                                                                | 061        |
| 4.1.2 System Composition and Function .....                                                         | 062        |
| 4.1.3 Main Technical Performance .....                                                              | 065        |
| 4.2 Error Correction .....                                                                          | 066        |
| 4.2.1 Time Error Correction .....                                                                   | 066        |
| 4.2.2 Radio Wave Refraction Error Correction .....                                                  | 066        |
| 4.2.3 Tracking Position Correction .....                                                            | 067        |
| 4.2.4 Other Errors .....                                                                            | 067        |
| 4.3 Error Influence Analysis .....                                                                  | 068        |
| 4.3.1 The Influence of Time Interpolation .....                                                     | 068        |
| 4.3.2 The Influence of Doppler Frequency Error .....                                                | 072        |
| 4.3.3 The Influence of Model Error .....                                                            | 077        |
| References .....                                                                                    | 082        |

|            |                                                |     |
|------------|------------------------------------------------|-----|
| Chapter 5  | Data Quality Inspection and Evaluation .....   | 083 |
| 5.1        | Random Error Characteristic Analysis .....     | 083 |
| 5.1.1      | Least Square Residual Error Statistics .....   | 083 |
| 5.1.2      | Autoregressive Residual Error Statistics ..... | 084 |
| 5.1.3      | Fault Tolerant Residual Error Statistics ..... | 086 |
| 5.2        | Data Fitting Superiority Analysis .....        | 087 |
| 5.2.1      | The Source of the Problem .....                | 087 |
| 5.2.2      | The Introduction of the Method .....           | 088 |
| 5.2.3      | Case Analysis .....                            | 089 |
| 5.2.4      | The Conclusion .....                           | 092 |
| 5.3        | Data Comparison Analysis .....                 | 092 |
| 5.3.1      | Inverse Calculation Comparison .....           | 093 |
| 5.3.2      | Result Comparison .....                        | 099 |
| 5.3.3      | Trend Analysis .....                           | 101 |
| References | .....                                          | 103 |

|            |                                                                                        |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Chapter 6  | Trajectory Determination of Short Baseline<br>Interferometer Data .....                | 104 |
| 6.1        | Combined Measurement Data Processing .....                                             | 104 |
| 6.1.1      | Processing Method .....                                                                | 104 |
| 6.1.2      | Application Effect .....                                                               | 106 |
| 6.1.3      | Conclusion .....                                                                       | 111 |
| 6.2        | Self Localization Technology of Short Baseline Interferometer .....                    | 112 |
| 6.2.1      | Processing Method .....                                                                | 112 |
| 6.2.2      | Related Problem Solving Method .....                                                   | 114 |
| 6.2.3      | Application Effect .....                                                               | 115 |
| 6.2.4      | Conclusion .....                                                                       | 116 |
| 6.3        | Angle Measurement Data Processing Technology of Short<br>Baseline Interferometer ..... | 116 |
| 6.3.1      | Processing Method .....                                                                | 116 |
| 6.3.2      | Application Effect .....                                                               | 118 |
| 6.3.3      | Conclusion .....                                                                       | 120 |
| References | .....                                                                                  | 120 |

|           |                                                                                                                                |     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Chapter 7 | Trajectory Determination and Evaluation of Multi<br>Velocity Measurement Data .....                                            | 121 |
| 7.1       | Computing Method of One Main Station and Several<br>Auxiliary Stations .....                                                   | 121 |
| 7.1.1     | Linear Difference Method .....                                                                                                 | 122 |
| 7.1.2     | Optimal Estimation Method .....                                                                                                | 125 |
| 7.2       | Computing Method of Two Main Stations and Several<br>Auxiliary Stations .....                                                  | 129 |
| 7.2.1     | Quasi-Newton Method .....                                                                                                      | 130 |
| 7.2.2     | Nonlinear Difference Method .....                                                                                              | 134 |
| 7.2.3     | Improved Least Square Method .....                                                                                             | 139 |
| 7.2.4     | Spline Constraint Method .....                                                                                                 | 144 |
| 7.3       | Analysis and Evaluation of the Influence of the Station<br>Position Structure .....                                            | 148 |
| 7.3.1     | Acquisition of Simulation Data .....                                                                                           | 148 |
| 7.3.2     | Analysis of Data Processing Precision .....                                                                                    | 149 |
| 7.3.3     | Analysis of Geometric Dilution of Precision .....                                                                              | 150 |
| 7.3.4     | The Influence of the Angle between the Target to the Main and the<br>Auxiliary Station on the Target Parameter Precision ..... | 150 |
| 7.3.5     | The Influence of the Baseline on the Target<br>Parameter Precision .....                                                       | 150 |
| 7.3.6     | Case Analysis of Station Layout .....                                                                                          | 151 |
| 7.3.7     | Conclusion .....                                                                                                               | 153 |
|           | References .....                                                                                                               | 153 |
| Chapter 8 | Data Fusion of Velocity Measurement System and<br>Other Measurement Systems .....                                              | 155 |
| 8.1       | Data Fusion of Multi Velocity Measurement System and<br>Optical Measurement System .....                                       | 155 |
| 8.1.1     | Introduction of Optical Measurement Data .....                                                                                 | 155 |
| 8.1.2     | Data Fusion Models .....                                                                                                       | 156 |
| 8.2       | Data Fusion of Multi Velocity Measurement System and<br>GNSS Measurement System .....                                          | 157 |
| 8.2.1     | Introduction of GNSS Measurement Elements .....                                                                                | 157 |

|       |                                                                                                   |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.2.2 | Unity of Coordinate System .....                                                                  | 158 |
| 8.2.3 | Calculation Method of Target Parameters .....                                                     | 159 |
| 8.2.4 | Case Analysis .....                                                                               | 161 |
| 8.3   | Data Fusion of Multi Velocity Measurement System and Radio<br>Measurement Range Change Rate ..... | 163 |
| 8.3.1 | Introduction of Radio Measurement Range Change .....                                              | 163 |
| 8.3.2 | Processing Method .....                                                                           | 163 |
| 8.3.3 | Case Analysis .....                                                                               | 166 |
| 8.4   | Data Fusion of the Short Baseline Interferometer and<br>Other Information .....                   | 167 |
| 8.4.1 | Data Fusion Models .....                                                                          | 167 |
| 8.4.2 | Case Analysis .....                                                                               | 170 |
| 8.4.3 | Conclusion .....                                                                                  | 172 |
|       | References .....                                                                                  | 172 |

---

# 第1章 概 论

---

随着现代电子科学技术的发展,雷达在理论上和技术上不断地得到提高,性能不断完善,应用日益广泛。早期的雷达主要应用于军事领域,并且注重远距离发现目标和测距的能力,现代雷达不但能够发现目标和测量目标的距离,还能够测量目标的速度、角度等参数。在现代战争中,可以说几乎所有的新式武器都是用雷达来实现控制。在民用和科学研究方面,如交通管制、气象观测、射电天文、地形测绘、卫星跟踪、靶场测量等领域,也都广泛地应用了雷达。随着现代军事武器装备的发展,人们对靶场雷达测量设备的要求越来越高,不但要能够测量单个目标的距离、速度、方位角、俯仰角,给出目标的三维立体信息,还要能在较远距离上对多个目标进行捕获、跟踪和测量,且对测量精度的要求也越来越高。

从20世纪80年代中期开始,随着雷达信号理论以及微电子技术、计算机技术的不断发展,国际上靶场测量雷达朝着体积小、质量小、数字化、高精度方向发展。发射和接收天线采用平面微带天线,雷达发射机采用全固态化元器件设计,接收机采用低噪声的零中频技术,终端采用谱分析和数字信号处理技术对目标参数进行高精度的测量。近年来,随着测速跟踪测量技术的发展和在试验靶场中不断增加的应用需求,推动了测速跟踪测量数据处理方法的不断发展和进步。特别是在航天测控网中,测速跟踪测量数据处理技术更占有重要的地位,它与统计学、信息论、优化理论、计算机科学等都有紧密的联系,是实现飞行目标外弹道自动化数据处理系统的重要技术基础,也是推进实现智能化处理能力的重要技术支撑。

本书将从航天工程应用的角度,以外测跟踪测量的测速数据为主要研究对象,围绕短基线干涉仪和多测速系统的数据处理理论与方法问题,从系统原理功能、技术指标、误差修正、质量检查到弹道计算与评估技术,进行全面阐述分析,以期全面、系统地梳理测速数据处理的相关技术问题,为测速系统测量数据的事后处理工作提供更多的处理途径。

## 1.1 测速系统在航天测控网中的作用

随着“神舟”系列载人飞船的试验成功,中国载人航天揭开了新篇章,航天测控从此进入了一个新的历史时期。航天技术的发展和空间资源的利用,需要各种飞行轨道的高精度机动测控体制进行跟踪测量。航天测控技术是运载工具和航天事业必不可少的组成部分,运载火箭/弹道导弹是否达到设计的命中精度,发射的航天器是否入轨,战略武器的弹道参数都是以测控系统提供的轨道测量数据为依据的。

在航天飞行器外弹道测量中,对航天器的跟踪测量和定轨方法研究一直是航天领域的热点问题,如何合理组建靶场飞行器跟踪测量网,对航天飞行器的飞行轨道进行跟踪测量非常重要。通常,航天靶场测量雷达是通过测量目标到雷达的径向距离、方位角和俯仰角对目标进行单站定位,或是测量飞行器相对于测站的斜距、方位角、俯仰角、距离和、距离差及其变化率等各种测量元素,通过一定的函数关系求解出轨道参数。目前,在靶场试验中,由于脉冲雷达含有测距功能,故体积庞大、系统复杂、稳定性差。因此,近年来新上的高精度多台(套)测速设备都不再设计测量距离功能,使得跟踪测量设备的构成更加简单,机动性更高,布站更加灵活,为航天测控、导弹武器的试验鉴定、定型,发挥了至关重要的作用:

(1) 提供精确弹道。高精度测速雷达系统集成度高、构成简单、转运灵活、展开便捷、使用型号类型广泛,是靶场向型号部门提供精确弹道不可替代的支柱系统。同时,由于采用连续无线电信号和由北斗授时、精确校频的参考信号源,使得以锁相原理工作的高精度测速雷达系统的测量精度远高于单脉冲雷达距离-测角数据的解算结果。

(2) 提供精确安控信息源。随着战略武器技术的发展,飞行弹道日益复杂,对安全管道的范围要求也更加严谨。高精度测速雷达系统提供的实时测量数据数量多、精度高、连续性和可靠性好,在成熟算法支持下,可生成严谨、平滑、完整的安控管道,确保了安控指挥员能够及时、准确的判断。

(3) 提高测控系统可靠性。目前,多测速系统已经在航天试验靶场进行了广泛装备,其跟踪测量信息比较多,特别是多增加的冗余测量信息,既可提高弹道测量精度,又可确保系统的可靠性,对圆满完成各类试验任务发挥着重要作用。同时,多测速系统的硬件由固态器件标准化制作,软件的设计执行工程化控制和风险管理规范,使得系统的可靠性更高。

(4) 布站机动灵活。当前,航天发射高密度已经常态化,发射间隔越来越短,装备的调整时间越来越少,对测量设备的要求越来越高。稳定、可靠、安全、