

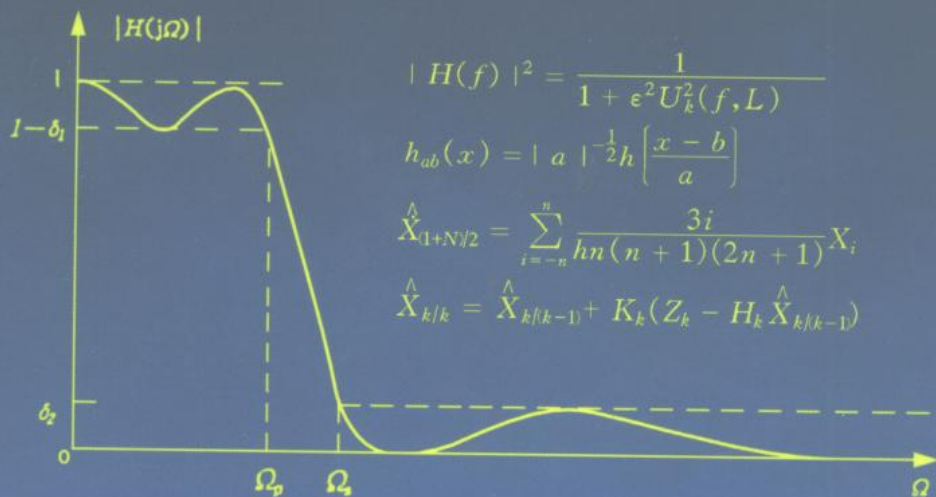


导弹航天测控通信技术丛书

外测数据事后处理

*Post-Flight Data Processing
of Trajectory Measurement*

刘利生 主编



国防工业出版社

1160.6

463850

169

导弹航天测控通信技术丛书

外测数据事后处理

Post-Flight Data Processing of
Trajectory Measurement

刘利生 主编



国防工业出版社

·北京·

DY5/09

图书在版编目(CIP)数据

外测数据事后处理/刘利生主编. —北京:国防工业出版社, 2000. 2

(导弹航天测控通信技术丛书)

ISBN 7-118-02188-1

I. 外… II. 刘… III. ①导弹试验: 飞行试验-数据处理②运载火箭-飞行试验-数据处理 IV. TJ760.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 21507 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 850×1168 1/32 印张 13 322 千字

2000 年 2 月第 1 版 2000 年 2 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 25.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,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,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。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

IV

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成
(以姓氏笔划为序)

朱森元 朵英贤 刘 仁 杨星豪

吴有生 何庆芝 何国伟 何新贵

宋家树 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

导弹航天测控通信技术丛书

编审委员会

名誉主任委员 沈荣骏

顾问 陈芳允 赵起增

主任委员 尚学琨

副主任委员 赵 军(常务) 罗海银 王文宝 左振平

委员 于志坚 刘 仁 刘蕴才 华仲春

(以姓氏笔划为序) 沈平山 张殷龙 林秀权 赵业福

侯 鹰 贺瑞法 聂 皓 郭詮水

陶有勤 高德江 隋起胜

主 编 刘蕴才(兼)

副 主 编 张纪生

秘 书 崔福红 李国强

《外测数据事后处理》

主 编 刘利生

编 著 者 刘利生 李 杰

主 审 陈贻迎

责任编辑 林秀权

序

为了发展导弹、航天事业,我们经过 40 年的艰苦奋斗,自立创新,建成了具有中国特色、先进、实用的导弹、航天测控网,圆满地完成了历次导弹、航天试验任务。

为了总结 40 年来取得的丰富经验,使其科学化、系统化、理论化,总装备部测量通信总体研究所在有关单位的支持、协同下,已经编著出版了《导弹卫星测控总体设计》、《导弹卫星测控系统工程》(上、下册),受到广大测控、通信技术人员的欢迎。现在,以总装备部测量通信总体研究所为主,组织有关试验基地、院校和原航天工业总公司及电子工业部有关研究所,共同编著一套覆盖测控与通信领域主要专业、包含丰富实践经验、具有较高理论水平的《导弹航天测控通信技术丛书》,这是我国导弹、航天测控领域一件具有重要意义的建设性工作。

本丛书包括《导弹测控系统》、《航天测控系统》(上、下册)、《光学测量系统》、《无线电跟踪测量系统》、《遥测遥控系统》(上、下册)、《计算机在测控网中的应用》、《试验通信技术》(上、下册)、《时间统一系统》、《外测数据事后处理》、《电波大气折射误差修正》和《导弹航天测控通信技术词典》等 11 卷 14 册。丛书的出版,将为我国导弹、航天测控与通信技术人员提供一套内容丰富的学习资料,亦为从事导弹、航天工程研制与试验的其它专业技术人员提供一套了解相关专业知识和进行技术交流的图书。期望这套丛书能帮助广大读者加深对导弹、航天测控与通信技术的了解和运用,共同促进我国导弹、航天测控与通信事业的进一步发展。

沈尚俊

1998 年 8 月 1 日

前 言

外测数据事后处理是指在导弹或运载火箭飞行试验后对弹道测量数据的处理,它是测控系统总体工作的一项重要内容,其处理结果将提供给导弹和运载火箭研制部门,作为型号试验的精度分析、评定和性能改进、提高的依据,也为测控系统总体设计、设备研制和使用提供反馈信息,改进和提高测控设备的测量精度。因此,型号研制部门、测控总体和测控设备研制、使用单位,都极为重视外测数据事后处理工作,都希望不断改进数据处理的方法和技术,以提高数据处理结果的质量和精度及处理工作的效率。

本书在总结近 40 年来我国导弹和运载火箭外测数据处理经验的基础上,理论联系实际,完整而系统地论述了外测数据事后处理的理论、方法和技术,其中包括多种不同测量体制外测系统(或设备)测量数据的处理流程、方法和技术。本书还详述了外测数据事后处理新方法研究成果。

全书共分十章,第一章绪论,第二章预备知识,第三章异常值的检验和处理,第四章随机误差的分析与统计,第五章观测数据的平滑与滤波,第六章测量系统误差的修正,第七章光电经纬仪数据处理,第八章脉冲雷达数据处理,第九章连续波雷达数据处理,第十章外测数据综合处理。其中第一、二、三、四、六、七、八、十章由刘利生同志撰写,第九章由李杰同志撰写,第五章由刘利生、李杰同志共同撰写,全书由刘利生同志统稿。

罗海银研究员、贺瑞法研究员、赵军高级工程师对书稿进行了审阅,黄学德研究员对书稿第九章进行了审阅,丛书主编刘蕴才和副主编张纪生为确保书稿的质量作了多次反复的修改,特别是长期从事数据处理工作的专家陈贻迎作为本书的主审对书稿进行了

细致的修改,国防工业出版社林秀权编审也付出了辛勤的劳动,还有,测通所机关对本书的编著做了大量的组织工作,在此一并感谢,此外,对本书编著、出版做了有益工作的同志也表示感谢。

由于本书内容广泛,作者水平有限,难免有错误之处,恳请读者批评和指正。

编著者

1998年8月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 外测数据事后处理的作用和地位	2
1.1.2 外测数据事后处理的分类	3
1.1.3 外测数据事后处理技术的发展	4
1.2 外测数据在导弹精度评定中的作用	6
1.2.1 导弹和运载火箭的精度评定	6
1.2.2 利用主动段终点外测数据鉴定制导系统精度	6
1.2.3 外、遥测数据比对分离制导系统工具误差	7
1.2.4 利用自由段末段外测数据鉴定制导系统精度	8
1.2.5 外、遥测数据综合利用分离制导系统工具误差	9
参考文献	10
第二章 预备知识	11
2.1 测量与测量误差	11
2.1.1 测量的分类	11
2.1.2 测量误差和分类	11
2.1.3 精密度、准确度和精度	13
2.2 数理统计和参数估计	13
2.2.1 子样和参数估计	13
2.2.2 χ^2 分布、 t 分布和 F 分布	16
2.2.3 假设检验	17
2.2.4 矩估计和最大似然估计	18
2.2.5 最小二乘估计	20
2.2.6 线性模型的假设检验	32
2.3 时间序列分析	34
2.3.1 随机过程和随机序列	34

2.3.2 均值函数和自协方差函数	35
2.3.3 平稳随机过程和平稳随机序列	36
2.3.4 自回归滑动平均模型(ARMA)	37
2.4 常用坐标系及转换关系	43
2.4.1 大地水准面	43
2.4.2 地球参考椭球体	43
2.4.3 子午面和卯酉面	44
2.4.4 地心空间直角坐标系	45
2.4.5 大地坐标系和天文坐标系	45
2.4.6 垂线偏差	46
2.4.7 其它常用坐标系	48
2.4.8 坐标系之间的转换	49
2.4.9 坐标系转换的新方法	53
2.4.10 站址坐标计算公式	54
参考文献	55
第三章 异常值的检验和处理	57
3.1 外推拟合法	57
3.1.1 异常值识别	58
3.1.2 异常值的估计	59
3.2 多项式回归模型检验法	61
3.2.1 多项式回归模型	61
3.2.2 带异常值的多项式回归模型	64
3.2.3 异常值检验和校正	65
3.3 ARIMA 模型检验法	67
3.3.1 带异常值的 ARIMA 模型	67
3.3.2 异常值的检验和校正	68
3.3.3 ARIMA 模型的参数估计	69
3.4 稳健滤波的 M 估计技术	72
3.4.1 M 估计的数学原理	72
3.4.2 M 估计的应用	74
参考文献	75
第四章 随机误差的分析与统计	77

4.1 平稳性和正态性检验	77
4.1.1 平稳性检验	78
4.1.2 正态性检验	80
4.2 隐周期的辨识和估计	82
4.2.1 谱函数和周期图	82
4.2.2 隐周期的识别和检验	85
4.3 变量差分法	96
4.3.1 数学原理	96
4.3.2 多项式拟合阶数的确定	99
4.3.3 差分步长的选择	100
4.3.4 推广的变量差分法	102
4.4 最小二乘拟合残差法	104
4.4.1 数学原理	104
4.4.2 利用 F 统计量检验多项式阶数	106
4.4.3 正交多项式拟合残差方法	108
4.5 ARMA 模型统计方法	109
4.5.1 ARMA 模型的有关知识	109
4.5.2 模型的辨识和建模	111
4.5.3 模型参数的估计	114
4.5.4 含趋势项的模型	117
4.5.5 含周期项的模型	119
参考文献	121
第五章 观测数据的平滑与滤波	123
5.1 白噪声观测数据多项式最优滤波器	124
5.1.1 白噪声多项式最优线性滤波器原理	124
5.1.2 滤波方差比及其性质	127
5.1.3 常用的位置、速度和加速度中心平滑公式	130
5.1.4 截断误差及其理论估计方法	133
5.1.5 速度奇次非中心平滑	137
5.2 平稳相关噪声多项式最优线性滤波器	140
5.2.1 平稳相关噪声多项式最优线性滤波	140
5.2.2 马尔可夫噪声的多项式最优线性滤波器	144

5.3 卡尔曼滤波器	148
5.3.1 连续型和离散型的状态和观测模型	148
5.3.2 卡尔曼滤波器原理	150
5.3.3 色噪声卡尔曼滤波器	154
5.3.4 广义卡尔曼滤波器	159
5.3.5 自适应滤波技术	162
5.4 频域数字滤波器	169
5.4.1 观测数据的频域描述	169
5.4.2 几种常见的理想频域数字滤波器	170
5.4.3 常用的低通滤波器	177
5.4.4 微分求速频域滤波器	182
参考文献	184
第六章 测量系统误差的修正	185
6.1 时间误差修正	185
6.1.1 时间误差对外测精度的影响	186
6.1.2 空间传播时延造成的误差	187
6.1.3 采样时刻不对齐误差	189
6.1.4 泰勒展开修正法	190
6.1.5 拉格朗日三点插值方法	191
6.2 电(光)波折射修正方法	192
6.2.1 电(光)波折射修正的基本概念	192
6.2.2 对流层电(光)波折射修正原理和模型	200
6.2.3 电离层电(光)波折射修正原理和模型	203
6.2.4 折射率计算公式	205
6.2.5 电(光)波折射修正的新方法	206
6.3 跟踪部位修正	213
6.3.1 跟踪部位修正的基本知识	213
6.3.2 弹体上任意两点间的位置和速度转换关系	222
6.3.3 跟踪部位修正公式	226
参考文献	229
第七章 光电经纬仪数据处理	230
7.1 数据处理流程	230

7.1.1 测量原理	230
7.1.2 数据处理流程	231
7.2 脱靶量和系统误差修正	234
7.2.1 脱靶量修正	234
7.2.2 系统误差修正	238
7.3 其它误差修正	244
7.3.1 时间误差修正	244
7.3.2 激光测距的跟踪部位修正	245
7.3.3 光波折射误差修正	248
7.3.4 角坐标转换	253
7.4 弹道参数解算	254
7.4.1 “L”公式和“K”公式	254
7.4.2 多台交会最小二乘估计法	258
7.4.3 递推最小二乘估计法	260
7.4.4 弹道速度和加速度的解算	261
参考文献	262
第八章 脉冲雷达数据处理	263
8.1 测量原理和数据处理流程	263
8.1.1 测量原理	263
8.1.2 数据处理流程	264
8.2 特殊处理的数学方法	265
8.2.1 系统误差修正	265
8.2.2 电波折射误差修正	269
8.2.3 角坐标转换	273
8.3 弹道参数的解算	273
8.3.1 单站测量弹道位置参数的解算方法	273
8.3.2 多站交会测量弹道位置参数的解算方法	274
8.3.3 速度和加速度解算方法	276
参考文献	278
第九章 连续波雷达数据处理	279
9.1 干涉仪测量数据预处理	279
9.1.1 测量原理	279

9.1.2	数据处理流程	281
9.1.3	特殊预处理方法	282
9.2	单套干涉仪解算弹道参数的方法	303
9.2.1	干涉仪测量元素的观测方程	303
9.2.2	弹道参数的求解方法	305
9.3	被动工作干涉仪数据处理	313
9.3.1	测量原理及观测量	314
9.3.2	被动干涉仪数据的预处理	315
9.4	连续波多站系统数据处理	320
9.4.1	连续波多站系统测量原理	321
9.4.2	连续波多站系统预处理流程	321
9.4.3	预处理方法	321
	参考文献	325
第十章	外测数据综合处理	326
10.1	综合处理流程	327
10.2	系统误差模型辨识	328
10.2.1	系统误差模型	328
10.2.2	系统误差模型辨识	331
10.2.3	利用自回归模型拟合系统误差	338
10.3	误差模型的参数估计和自校准	340
10.3.1	“EMBET”自校准技术原理	341
10.3.2	残差方程和“EMBET”方法	348
10.3.3	“EMBET”的主成分估计方法	352
10.3.4	样条约束的“EMBET”方法	360
10.4	主动段弹道参数解算	365
10.4.1	光学和雷达联测弹道参数解算法	366
10.4.2	多套连续波雷达联测弹道参数解算法	368
10.5	测速增量自定位技术	369
10.5.1	自定位技术的数学原理	369
10.5.2	大增量数据自定位技术	370
10.5.3	小增量数据自定位技术	373
10.6	再入段弹道参数解算	375