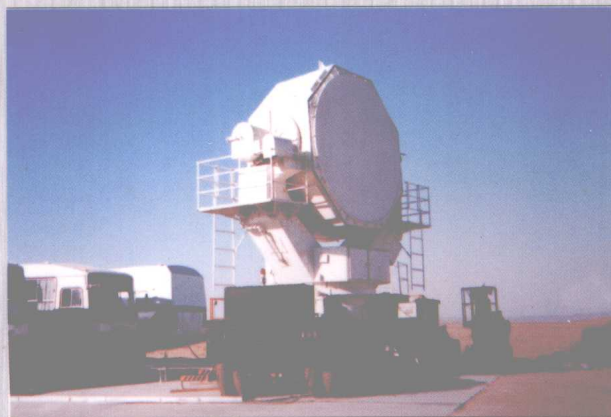


相控阵雷达数据处理

Phased Array Radar Data Processing



徐振来
著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

相控阵雷达技术丛书

相控阵雷达数据处理

PHASED ARRAY RADAR DATA PROCESSING

徐振来 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

相控阵雷达数据处理/徐振来著. - 北京:国防工业出版社, 2009. 4

(相控阵雷达技术丛书)

ISBN 978-7-118-05237-4

I. 相... II. 徐... III. 相控阵雷达—数据处理 IV. TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 097012 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×960 1/16 印张 16¼ 字数 296 千字

2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1 3000 册 定价 55.00 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

内 容 简 介

本书是相控阵雷达数据处理方面的一本专著,是作者多年来研究和应用该技术的总结,主要论述了相控阵雷达对机动目标和轨道目标进行跟踪的数据处理方法。

著者首先介绍了相控阵雷达数据处理中主要使用的最小二乘方估计和卡尔曼滤波,并给出了为满足实时处理和提高精度要求的处理方法;论述了雷达测量坐标系的选择、目标运动模型的设计和多个目标跟踪相关;对于相控阵雷达重要应用领域——弹道系统和卫星的探测,论述了实时定轨方法。

本书可供从事雷达系统研制、使用和维护的科技人员及相关领域的工程技术人员、高等院校师生学习参考。

The present book is a monograph in respect of the phased array radar data processing. It is a summary of studying and applying by author for some years. The data processing methods for tracking both the maneuvering target and the orbital target are the main content expounded in the book.

Both the least square estimation and Kalman filter used mainly for data processing of the phased array radar are discussed first, and processing methods satisfying requirements of real-time processing and precision increasing are given. It illuminates selecting coordinate system for radar measurement, designing motion model of targets and correlation method for multiple targets. In the important areas of applying phased array radar, surveying ballistic missile and earth satellite, the methods of real-time determination on the orbit are expounded.

It is suitable for the practical engineers working on the radar system and the relative field to read as well as for the advanced undergraduates and graduates to view as a reference material.

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,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。

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总装备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,由总装备部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,原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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委 员 (按姓氏笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参 李德毅

杨星豪 吴有生 何新贵 佟玉民 宋家树

张立同 张鸿元 陈冀胜 周一宇 赵凤起

侯正明 常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 王小谟

《相控阵雷达技术丛书》编委会

名誉主任	张直中				
主 任	左群声	罗 群			
副 主 任	张光义	贲 德	徐文官	邵智民	
	周万幸				
委 员	华海根	王德纯	黄为倬	许建峰	
	马 林	倪嘉骊	陈国海	朱炳元	
	金 林	刘 岱	邢文革	林幼权	
	于文震	胡明春	郑 新	赵玉洁	
	叶渭川				

丛书序

雷达是重要的信息获取装备,是各种先进作战平台和指挥控制系统的耳目,在国防建设、经济建设、科学研究中应用广泛并获得了持续发展。相控阵雷达具有快速改变天线波束指向和波束形状、可用多部发射机在空间进行功率合成、易于形成多个发射与接收波束、可使相控阵天线与雷达平台共形等特点,在观测高速运动目标、实现多种雷达功能和多目标跟踪、推远雷达作用距离等方面都具有特别的优势,因此成为当今雷达发展的主流。

随着雷达观测目标种类的增多,要求雷达测量的目标参数不断增加并提高雷达电子对抗能力及目标识别的能力,有源相控阵雷达、宽带相控阵雷达、数字相控阵雷达、多波段综合一体化相控阵雷达成了当今相控阵雷达发展的重要方向。相控阵雷达的工作频段也在不断扩展,除了常用的微波波段外,向下已扩展至短波波段,例如天波、地波超视距雷达;向上已扩展至毫米波波段;现正开始研究光波波段的相控阵雷达。

相控阵雷达及其技术的高度发展,受到国内外各方面的高度重视。国内从事雷达研究、生产、教学与使用的部门与有关人员深入了解相控阵雷达及其技术的兴趣与需求持续提高。这是促使南京电子技术研究所组织撰写《相控阵雷达技术丛书》的一个重要原因。

南京电子技术研究所从 20 世纪 60 年代初即开始了相控阵雷达及其有关技术的研究,先后在我国首次成功地研制成多种战略、战术应用相控阵雷达,并成功地解决了相关的理论和技术难题。在这些相控阵雷达研制过程中积累的知识和经验是本丛书各位作者写作的基础,因此可以说,

本丛书的出版在一定程度上也反映了南京电子技术研究所许多科技工作者的智慧和成果。参加本丛书撰写的作者均是多年从事相控阵雷达研制工作并获得过多项国家及部委级科技成果奖的专家,因此,本丛书具有内容创新、重点突出、理论联系实际、易于理解等特点。

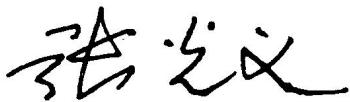
《相控阵雷达技术丛书》共包括七个分册,内容涵盖相控阵雷达天线、相控阵雷达馈线、相控阵雷达接收系统、有源相控阵雷达及其关键部件收发组件、相控阵雷达数据处理、宽带相控阵雷达及相控阵雷达原理。

这套丛书受到南京电子技术研究所领导的高度重视,前任所长左群声研究员,现任所长罗群研究员,副所长倪嘉骊研究员等均给予了大力支持、有力组织,指导丛书的写作全过程,并安排了所里科技部门、技术情报部门做好各项配合工作,使丛书的各位作者能顺利完成写作工作。

在丛书撰写过程中,得到了张直中院士、贲德院士、黄为倬、华海根、邵智民、周冠杰、董树人、董士嘉、孙茂友、杜耀惟等研究员以及副所长周万幸、马林、陈国海研究员的支持与鼓励,与他们的技术讨论对完成本丛书的写作是非常有益的。我所科技部及技术基础部情报研究部门的王震、赵玉洁、叶渭川、陈玲、王炳如等同志对丛书的撰写做了大量的组织、协调、编辑、校对工作;王园、谷静、张素军、张权、张文勇、张坚、石凯军、孙惠媛等同志帮助作者做了大量文字输入、排版和编辑工作,在此一并表示衷心感谢!

《相控阵雷达技术丛书》的出版,特别要感谢国防科技图书出版基金评审委员会的大力支持,感谢王小谟院士和各位评审专家及国防工业出版社王晓光编审的认真、细致和辛勤的工作!

由于水平有限,不足之处与错误在所难免,诚请并衷心感谢读者赐正!



2006年7月1日

前言

相控阵雷达的搜索、截获、跟踪波束是灵活可控的,不但可以根据需要设置各类不同波束在空间的位置,还可以根据不同任务,设置各类波束的不同驻留时间,驻留之间的不同时间间隔,每一波束的信号形式及处理方法。雷达的搜索、截获和跟踪状态,根据空情和任务需求,可以在“最佳”条件下进行转换,进行合理的时间—能量调度,从而使相控阵雷达具有多目标、多功能、实时性和高精度的特点,相控阵雷达应用领域也因此越来越广泛。雷达平台有陆基固定式的,也有舰载或机载移动式的,所要对付的目标类型也越来越多,从一般的气动目标、高速高机动目标、地(舰)空导弹、空地导弹、地地弹道式导弹到围绕地球运行的人造地球卫星。相控阵雷达广泛的应用领域,所要跟踪测量目标的多样性质,决定了相控阵雷达数据处理所要解决问题的广度与深度。

本书是作者多年从事相控阵雷达数据处理的研究与应用的成果总结。作者曾从事相控阵雷达对机动目标的搜索跟踪,对地地弹道式导弹的截获跟踪和落点预报,对地空导弹的截获跟踪和制导,对外空目标的截获跟踪、轨道确定和预报等。因此,本书的选材,也主要是这些在相控阵雷达工程中应用并得到检验的方法及成果;另外,对每一专题的选材则相对集中,更广泛的内容,敬请读者参阅相应的文献资料和著作。与同类著作相比,本书具有以下特点:①涉及了机动目标和轨道目标两类跟踪测量问题,而每一专题选材又相对集中,有针对性;②工程性强,又有理论推导;③为了便于工程技术人员阅读,对方法的描述较详细,给出了必要的推导过程。

全书分为5章。第1章概括地描述了相控阵雷达数据处理的任务和

方法。第2章深入浅出地讨论了相控阵雷达数据处理的最基本方法——最小二乘方估计,给出了一般的推导方法、误差分析,以及工程应用形式。第3章跟踪滤波,是相控阵雷达数据处理中的基础。该章从线性无偏最小方差估计出发,导出了卡尔曼(Kalman)滤波公式,在此基础上,推导出了线性中点平滑公式。将卡尔曼滤波方法应用到目标机动运动模型,可以使相控阵雷达实现对高机动运动目标的跟踪;而将线性中点平滑公式用于轨道目标的测定,则可以减少轨道模型的不确定性,使相控阵雷达的测轨精度进一步提高。该章最后讨论了相控阵雷达多目标的跟踪相关问题。与传统的“波门相关”不同,这里提出“整体相关”的概念,并给出了“整体相关”的算法。第4章讲述椭圆轨道。相控阵雷达要对付的轨道目标是地地弹道式导弹和低轨卫星,它们的瞬时轨道可以看成是一个椭圆。该章首先讨论了时间系统和坐标系,轨道运动的方程,接着讨论了如何根据相控阵雷达的测量确定轨道,特别是根据相控阵雷达对目标测量的特性,进一步提高定轨精度的方法。第5章轨道目标的运动预报,是第4章的继续。对近地卫星,预报其围绕地球运动时的临空时间和运动参数,对地地弹道式导弹,预测其每一时刻的位置、速度和落点,提供预警时间;也给出了提高导弹落点预报精度的方法。该章的最后一节给出的是根据标准弹道的射程、发点和落点设计椭圆弹道的方法。在相控阵雷达战术、技术指标的论证中,设计仿真用的椭圆弹道的方法,给指标论证带来了很大方便。

在本书出版之际,首先要感谢张光义院士。由于他的建议与推荐,才有本书的成型;还要感谢作者的同事们和学生,他们所取得的工作成果和工程实践结果,为本书的撰写提供了充实的内容。同时感谢国防科技图书出版基金评审委员会的资助和国防工业出版社的大力支持。

由于作者水平有限,缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

徐振来

2008年9月

目 录

第 1 章	相控阵雷达数据处理的任务和方法	1
第 2 章	最小二乘方估计	5
2.1	引言	5
2.2	最小二乘方估计的一般讨论	6
2.3	误差分析	11
2.4	逼近多项式阶数的选取	17
2.5	最小二乘方估计与最小方差估计	19
2.6	数据平滑	21
2.7	最小二乘方估计各点的误差分析	34
2.8	截断误差讨论	38
2.9	分组数据平滑法	40
2.10	加权最小二乘方估计	48
2.11	数据平滑的循环递推形式	50
第 3 章	跟踪滤波	56
3.1	引言	56
3.1.1	最小方差估计	56
3.1.2	极大验后估计与极大似然估计	58
3.1.3	线性最小方差估计	58
3.1.4	最小二乘方估计	59
3.2	线性无偏最小方差估计	61
3.3	卡尔曼滤波	64
3.4	线性中点平滑	70
3.5	目标跟踪的运动模型	81

3.5.1	Singer 模型	82
3.5.2	Singer 模型的性能	88
3.6	分段常增益滤波	92
3.6.1	分段常增益滤波方法描述	92
3.6.2	设计实例	94
3.6.3	跟踪模拟	98
3.6.4	稳态增益与机动目标跟踪	99
3.7	相控阵雷达的跟踪坐标系	100
3.7.1	相控阵雷达的测量坐标系	101
3.7.2	直角坐标系中的跟踪问题	104
3.7.3	稳定坐标系	106
3.8	多目标跟踪相关	108
3.8.1	“最近邻”法	108
3.8.2	贝叶斯估计	110
3.8.3	整体相关	113
第 4 章	椭圆轨道	123
4.1	引言	123
4.2	时间与坐标系统	124
4.2.1	天球及其运动	124
4.2.2	坐标系	125
4.2.3	时间系统	126
4.2.4	时间转换	133
4.2.5	惯性坐标系	135
4.2.6	世界时 UT0, UT1 和 UT2	138
4.2.7	国际原子时 AT1 和协调世界时 UTC	138
4.3	坐标系的转换	139
4.3.1	各种坐标的定义及相互关系	139
4.3.2	历元地心惯性系与瞬时平赤道地心系的转换	140
4.3.3	瞬时平赤道地心系与瞬时真赤道地心系的转换	141
4.3.4	瞬时真赤道地心系与轨道坐标系的转换	143
4.3.5	历元地心惯性系与轨道坐标系的转换	143
4.3.6	准地固坐标系与地固坐标系的转换	144
4.3.7	地固坐标系与站心赤道坐标系的转换	144
4.3.8	站心赤道坐标系与站心地平坐标系的转换	146
4.3.9	轨道坐标系与地固坐标系的转换	146

4.3.10 地固坐标系与站心地平坐标系的转换	147
4.4 椭圆运动的微分方程	147
4.5 椭圆轨道的特征——轨道根数	150
4.5.1 微分方程的解(1)——轨道平面参数与面积速度	150
4.5.2 微分方程的解(2)——轨道椭圆参数	152
4.5.3 微分方程的解(3)——过近地点的时刻参数	155
4.6 用相控阵雷达的测量数据确定卫星轨道	159
4.6.1 相控阵雷达测量误差的处理	159
4.6.2 从雷达测量数据到惯性坐标	167
4.6.3 从惯性坐标到轨道根数	171
4.6.4 小偏心率轨道	175
4.7 卫星运动轨道的改进	176
4.8 弹道式导弹轨道的改进	185
第5章 轨道目标的运动预报	188
5.1 引言	188
5.2 轨道运动的摄动修正	188
5.2.1 地球非球形引力摄动	188
5.2.2 大气阻力摄动	202
5.3 轨道目标的运动预报	214
5.3.1 预报未来某一时刻相对于雷达站的位置	215
5.3.2 预测未来某一时刻所处的经度、纬度和高度	217
5.4 卫星预报	218
5.5 导弹射程和落点预报	219
5.6 弹道导弹落点预报精度的提高	221
5.7 根据标准弹道的射程、发点和落点设计椭圆弹道	225
附录 前 n 项自然数 k 次方求和公式	234
符号表	235
参考文献	239

Contents

Chapter 1	Mission and Method of Processing Data of Phased Array Radar	1
Chapter 2	Least Square Estimation	5
2.1	Introduction	5
2.2	Discussion of Least Square Estimation	6
2.3	Error Analysis	11
2.4	Selecting the Order of Approximating Polynomial	17
2.5	Least Square Estimation and Least Variance Estimation	19
2.6	Data Smoothing	21
2.7	Analyzing Error of Least Square Estimation	34
2.8	Discussing Truncation Error	38
2.9	Methods for Grouping Data Smoothing	40
2.10	Weighted Least Square Estimation	48
2.11	Recurrence Formula of Data Smoothing	50
Chapter 3	Tracking and Filtering	56
3.1	Introduction	56
3.1.1	Minimum Variance Estimation	56
3.1.2	Maximum Posterior Estimate and Maximum Likelihood Estimate	58
3.1.3	Linear Minimum Variance Estimation	58
3.1.4	Least Square Estimation	59
3.2	Linear Unbiased Least Variance Estimation	61

3.3	Kalmam Filter	64
3.4	Linear Mid-point Smoothing	70
3.5	Motion Model for Tracking Target	81
3.5.1	Singer Model	82
3.5.2	Performance of Singer Model	88
3.6	Piecewise Constant Gain Filter	92
3.6.1	Description of Piecewise Constant Gain Filter	92
3.6.2	Designing Example	94
3.6.3	Tracking Simulation	98
3.6.4	Stationary Gain and Maneuvering Target Tracking	99
3.7	Tracking Coordinate System for Phased Array Radar	100
3.7.1	Measurement Coordinate System of Phased Array Radar	101
3.7.2	Tracking Problems in Cartesian Coordinate System	104
3.7.3	Stationary Coordinate System	106
3.8	Multiple Target Tracking Correlation	108
3.8.1	“Nearest Neighbor” Approach	108
3.8.2	Beyes Estimation	110
3.8.3	Whole Correlation	113
Chapter 4	Elliptic Orbit	123
4.1	Introduction	123
4.2	Time and Coordinate System	124
4.2.1	Celestial Sphere and Its Motion	124
4.2.2	Coordinate Systems	125
4.2.3	Time System	126
4.2.4	Time Transformation	133
4.2.5	Inertial Coordinate System	135
4.2.6	Universal Time UT0, UT1 and UT2	138
4.2.7	International Atomic Time ATI and Coordinated Universal Time UTC	138
4.3	Transformation of Coordinate Systems	139
4.3.1	The definition of Several Coordinates and Mutual Transformation relation	139
4.3.2	Transformation Between the Geocentric Inertial Coordinate System of Epoch and the Instantaneous Mean Geocentric Equatorial Coordinate System	140