相控阵雷达数据处理及其仿真技术

Phased Array Radar Data Processing and Its Simulation Techniques

蔡庆宇 薛毅 张伯彦 著

TN958.92
1001-2

相控阵雷达数据处理及其仿真技术

蔡庆宇　薛　毅　张伯彦　著



一九九 七年 九月十 四日
30763163

国防工业出版社
·北京·

763163

图书在版编目(CIP)数据

相控阵雷达数据处理及其仿真技术/蔡庆宇等著. —北京:国防工业出版社,1997.1

ISBN 7-118-01570-9

Ⅰ.相… Ⅱ.蔡… Ⅲ.①相控阵雷达-数据处理②相控阵雷达-仿真 Ⅳ.TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 24102 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9⅞ 254 千字

1997 年 1 月第 1 版 1997 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:18.00 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

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
第二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	刘琯德
委员 （按姓氏笔划为序）	尤子平　朱森元　朵英贤 刘　仁　何庆芝　何国伟 何新贵　宋家树　张汝果 范学虹　胡万忱　柯有安 侯　迁　侯正明　莫梧生 崔尔杰

序

相控阵雷达是雷达体制的一个重要的新发展。它打破了常规雷达固定波束驻留时间、固定扫描方式、固定发射功率和固定数据率的限制，具有灵活的多波束指向及驻留时间、可控的空间功率分配及时间资源分配等特点，从而使相控阵雷达具有一个重要的优点——多功能，即能同时完成搜索和对多个目标的精密跟踪。

相控阵雷达数据处理是实现这一多功能操作的关键部分。相控阵雷达的数据处理提供经过滤波处理的目标当前数据及预测数据，这是波束指向的依据；提供质量良好的目标航迹，这是大量相关处理的结果；还提供何时以何种频率和波形操作的工作模式，这是调度处理的结果。所以从某种意义上讲，相控阵雷达的数据处理是雷达最佳地完成其规定任务的一系列算法。

本书作者多年从事雷达系统控制方面的研究和设计，这本书正是他们对自己工作经验和研究成果的理论概括和技术总结。所以，无论从理论上还是从实践上，本书对于致力于现代雷达研究与设计的科学家和工程师们无疑具有重要的实用价值和指导意义。由于本书所述论题涉及的内容广泛、新颖且自成体系，所以，对高等院校雷达专业、自动控制专业及专家系统和数据处理等方面的研究生均有参考价值。

相控阵雷达的数据处理是一门蓬勃发展的新学科，涉及到动态系统理论、统计滤波理论、计算机控制和专家系统等学科，愿本书的出版为我国相控阵雷达技术赶超世界先进水平带来新的推动力。

黄培康

1995.1.26

前　言

计算机大量地嵌入相控阵雷达系统中来，已经使雷达系统体系结构发生了质的变化。像当今任何具有嵌入计算机的大型复杂实时系统一样，现代雷达已不再是硬件的集合体，而是硬件和软件的综合体，面对计算机及其软件在现代雷达系统中所起的非凡的作用，人们不得不彻底地改变以往把雷达系统看作“电气”和“机械”两大组成部分的习惯，而将现代雷达系统全新地分解为“雷达设备”和“雷达控制器”两大组成部分。这里“雷达设备”是指雷达设备的物理实体，而“雷达控制器”是指嵌入雷达系统的计算机系统及实现雷达多功能操作的各种算法和软件。正如大家所了解的那样，对于雷达设备的组成和工作原理，国内外已出版了不少专著。而由于空中目标的日趋多样化、复杂化以及高动态性能等因素，对雷达技术提出了许多新的要求，随着大规模集成电路、计算机的发展，“雷达控制器”方面的内容也越来越受到雷达系统设计和研制工作者的关心和重视。为了适应相控阵雷达这一发展需要，本书试图系统地总结并概括作者们十几年来从事雷达系统研究与设计工作的实践经验和研究成果，力图对“雷达控制器”中实现雷达多功能操作的算法和软件——相控阵雷达数据处理——问题进行理论概括和技术总结。

全书共分七章。第一章概括地介绍相控阵雷达数据处理系统的特点及应用举例。第二章论述线性系统的最优估计理论。这一章内容是相控阵雷达数据处理的基础，这里除介绍线性系统最优估计基本概念外，还详细地介绍 Kalman 滤波的推导过程，以及工程应用中需要的目标运动模型和常增益滤波器。第三章是在第二章的基础之上，介绍非线性系统的滤波理论，特别是推广 Kalman

滤波以及相应的应用成果。自第四章起，我们展开对相控阵雷达数据处理的专题研究。第四章探讨工程设计中跟踪机动目标的有效算法。这里包括一些传统的成熟的方法，如变维数滤波方法、Singer 模型等。但其重点是介绍一些新的机动目标跟踪方法，如均值检测自适应滤波、方差检测的自适应滤波以及基于截断正态分布的随机加速度模型。第五章介绍复杂环境中的目标跟踪问题，这里的复杂环境不仅是指干扰环境，还包括多目标环境和运动载体环境等。这一章的重点是介绍一些新的相控阵雷达数据处理方法，如用模糊集合理论处理多目标的跟踪问题、群目标数据处理的逻辑功能，以及在运动载体环境下的目标跟踪问题。在论述这些问题的同时还给出了系统框图和仿真试验结果。第六章对相控阵雷达数据处理作进一步的研究，主要介绍相控阵雷达工作方式的调度策略研究；数据率的自适应控制，以及专家系统在相控阵雷达中的应用。第七章描述相控阵雷达数据处理的计算机仿真技术，特别给出了系统仿真建模的步骤及确定系统仿真软件总体方案的方法。

本书为了系统地论述相控阵雷达数理处理研究中的最新成果，并使读者对涉及到的理论有一个较为全面的认识，从第二章起，每章后均设有小结。从小结以及后面的参考文献中，读者可以了解到目前正在进行研究的有关工作和国内外发展动态。

本书在蔡庆宇同志指导下完成。薛毅同志著第二章及第四章的§4.2；张伯彦同志著第一章，第三章，第四章的§4.5 和第五章的§5.7；其余章节由蔡庆宇同志撰著。

本书是作者十几年来在该领域研究工作的总结，同时也综合了近年来该领域在国际上的发展动态。致力于这一领域的科学家和工程师们所取得的工作成果，在公开刊物上发表的文献著作以及作者的同事和学生们与作者一起在这一领域作出的持续有效的努力，均为本书的撰写奠定了基础，作者在此表示衷心的感谢。

相控阵雷达数据处理是一个新颖的研究课题，其相应的理论和应用算法都在不断地发展。作者因受水平的限制，难免在取材和结构上存在不妥之处，难免出现一些错误，敬希同行专家和广大读

者能给我们提出宝贵的批评和建议。另外，为便于排版，书中方程组的公式序号，均排在该方程组最后一个公式之后，希读者注意。

在本书出版之际，谨向曾对我们予以支持和帮助的黄纬禄院士、毛士艺教授和杨振海教授表示衷心的感谢，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。

著　者

1995 年 3 月于北京

目　录

第一章　概　述

§1.1　相控阵雷达技术概述 …… (1)

1.1.1　相控阵雷达的发展概况 …… (1)

1.1.2　相控阵雷达的基本组成及工作过程 …… (2)

1.1.3　相控阵雷达天线及电扫描技术 …… (4)

§1.2　相控阵雷达数据处理技术 …… (7)

1.2.1　相控阵雷达中的嵌入式数字计算机的特点 …… (7)

1.2.2　相控阵雷达中的计算机软件系统 …… (8)

1.2.3　相控阵雷达数据处理系统的功能与特点 …… (10)

§1.3　相控阵雷达数据处理系统的应用举例 …… (15)

1.3.1　一个相控阵雷达数据处理系统在防空系统中的应用 …… (15)

1.3.2　典型的相控阵雷达数据处理系统在舰船指控系统中的应用 …… (19)

参考文献 …… (24)

第二章　线性系统的最优估计

§2.1　引　言 …… (27)

§2.2　随机估计的一般方法 …… (27)

2.2.1　估计问题的构成 …… (27)

2.2.2　最小二乘估计 …… (28)

2.2.3　最小均方误差估计 …… (30)

2.2.4　极大似然估计 …… (32)

2.2.5　极大后验估计 …… (33)

2.2.6　最小线性均方误差估计 …… (34)

2.2.7　递推最小二乘估计 …… (37)

§2.3　线性系统的滤波方法 …… (42)

2.3.1 状态估计问题 …… (42)
2.3.2 离散线性系统的 Kalman 滤波 …… (43)
2.3.3 Kalman 滤波的基本性质 …… (50)
2.3.4 连续时间系统的连续描述与离散描述的关系 …… (51)
§2.4 目标运动模型 …… (53)
2.4.1 常速度模型 …… (53)
2.4.2 常加速度模型 …… (55)
§2.5 常增益滤波器 …… (57)
2.5.1 常增益滤波器的设计 …… (57)
2.5.2 α-β 滤波器 …… (59)
2.5.3 α-β-γ 滤波器 …… (65)
§2.6 小 结 …… (67)
参考文献 …… (67)
第三章 非线性滤波
§3.1 引 言 …… (69)
§3.2 推广 Kalman 滤波 …… (69)
§3.3 推广 Kalman 滤波的应用 …… (80)
3.3.1 坐标系、测量模型及状态模型 …… (81)
3.3.2 直角坐标推广 Kalman 滤波 …… (85)
3.3.3 距离方向余弦推广 Kalman 滤波 …… (86)
§3.4 先进的非线性滤波器 …… (90)
3.4.1 推广 Kalman 滤波器的偏倚误差 …… (90)
3.4.2 几种先进的非线性滤波器 …… (93)
§3.5 小 结 …… (94)
参考文献 …… (95)
第四章 机动目标跟踪
§4.1 引 言 …… (96)
§4.2 机动目标检测的自适应滤波方法 …… (97)
4.2.1 调整过程噪声的方法 …… (97)
4.2.2 变维数滤波方法 …… (99)
§4.3 检测及状态自适应调整滤波器 …… (104)
§4.4 相关噪声模型——Singer 模型 …… (118)

§4.5 机动目标的截断正态概率密度模型 …… (122)
4.5.1 R.A.Singer 模型及局限性 …… (123)
4.5.2 加速度的非零均值时间相关的截断正态概率模型 …… (127)
4.5.3 自适应滤波系统 …… (131)
4.5.4 非零均值模型及自适应算法的稳态确定性误差及其频域滞后校正作用 …… (133)
4.5.5 仿真结果 …… (137)
§4.6 修正的常增益自适应滤波方法 …… (139)
§4.7 小 结 …… (151)
参考文献 …… (152)
第五章 复杂环境中的目标跟踪
§5.1 引 言 …… (153)
§5.2 测量的证实 …… (154)
§5.3 干扰环境中的单目标跟踪 …… (156)
5.3.1 最近邻域滤波法(NNF) …… (157)
5.3.2 概率数据关联滤波器(PDAF) …… (158)
§5.4 在干扰环境下的多目标跟踪 …… (163)
§5.5 模糊子集理论在多目标跟踪中的应用 …… (168)
5.5.1 模糊最小方差估计 …… (168)
5.5.2 多目标跟踪的模糊滤波算法 …… (170)
5.5.3 模糊关系矩阵和隶属矩阵 …… (174)
5.5.4 仿真实验结果 …… (177)
§5.6 编队飞行目标群的跟踪逻辑 …… (178)
5.6.1 问题的提出 …… (178)
5.6.2 群目标数据处理系统的逻辑功能 …… (179)
§5.7 运动载体环境下的目标跟踪问题 …… (192)
5.7.1 舰载雷达跟踪问题概述 …… (192)
5.7.2 参照系及坐标系 …… (193)
5.7.3 相对速度与相对加速度的推导 …… (201)
5.7.4 舰载雷达跟踪系统框图和仿真试验 …… (206)
§5.8 小 结 …… (210)
参考文献 …… (211)

第六章　相控阵雷达数据处理专题研究

§6.1　引　言 …… (214)
§6.2　稠密多目标航迹初始化方法 …… (215)
6.2.1　分群处理 …… (215)
6.2.2　航迹初始化 …… (218)
6.2.3　一个工程应用实例 …… (223)
§6.3　相控阵雷达工作方式的调度策略 …… (226)
6.3.1　概述 …… (226)
6.3.2　影响调度策略的主要因素 …… (226)
6.3.3　自适应调度策略 …… (231)
6.3.4　调度程序的设计方法 …… (234)
6.3.5　仿真试验结果 …… (239)
§6.4　相控阵雷达数据率的自适应控制 …… (241)
6.4.1　常增益变采样间隔滤波器 …… (242)
6.4.2　变采样间隔算法 …… (243)
6.4.3　仿真结果及结论 …… (244)
§6.5　专家系统及其在相控阵雷达数据处理系统中的应用 …… (249)
6.5.1　专家系统发展概况 …… (249)
6.5.2　专家系统的研究对象和结构 …… (250)
6.5.3　一个相控阵雷达工作方式调度的专家系统——SOMPAR 专家系统 …… (250)
§6.6　小　结 …… (257)
参考文献 …… (258)

第七章　系统仿真技术

§7.1　引　言 …… (259)
§7.2　仿真系统的硬件环境 …… (260)
§7.3　系统仿真建模方法学 …… (261)
7.3.1　系统仿真建模步骤 …… (261)
7.3.2　确定系统仿真软件总体方案 …… (261)
§7.4　系统运动模型的仿真 …… (264)
7.4.1　目标运动模型的仿真 …… (264)

7.4.2 测量过程的仿真 …… (268)
7.4.3 跟踪滤波及航迹管理 …… (276)
§7.5 仿真运行实例 …… (286)
§7.6 小 结 …… (290)
§7.7 附录:噪声协方差矩阵 $\boldsymbol{R}(k)$与初始协方差矩阵 $\boldsymbol{P}(0/0)$的计算 …… (291)
参考文献 …… (301)

第一章 概 述

§1.1 相控阵雷达技术概述

在进行相控阵雷达数据处理专题研究之前，我们有必要对相控阵雷达技术作一简明扼要的概述：在1.1.1节中介绍相控阵雷达的发展概况，然后在1.1.2节中给出相控阵雷达的基本组成及其工作过程，最后在1.1.3节中叙述相控阵雷达的天线及电扫描技术。

1.1.1 相控阵雷达的发展概况

相控阵雷达是一种多功能、高性能的新型雷达，是客观需要和科技发展到一定阶段的产物。50年代以后，由于各种高速飞行器——导弹、洲际导弹和人造卫星等的出现，对雷达提出了两个要求：第一是作用距离要远，能发现和测量5000km外的目标；第二是天线波束扫描要快，能跟踪速度为音速20倍的目标，并缩短控制反应时间，提高跟踪速度。对于第一个问题，一般来说只要加大天线面积和无线电波的发射功率，以及减少接收机噪声就可解决。但对于第二个问题，对机械扫描的常规雷达(称为第一代雷达)来说，已不能胜任。因为机械扫描雷达其天线和波束是一起转的，直径达几十米、重量达几百吨的天线转一圈往往要几秒钟。因此，在50年代，为了改变雷达扫描技术的落后面貌，人们提出应用电扫描技术来改进机械扫描技术，并开始研制电扫描雷达波束指向系统，它标志着第二代雷达的产生。这种雷达的突出优点是，在搜索和跟踪目标时，整个天线系统可以固定不动，天线波束指向不必用机械伺服系统来控制，而是通过控制阵列天线中各个单元的相位，

得到所需的天线方向图和波束指向，使波束在一定空域中按预定规律进行扫描。由于不存在机械运动惯性，改变波束指向所需控制时间就很短，大约需十几微秒，是常规雷达反应时间（大约几秒）的几十万分之一。

在60年代，随着各种新型微波电子元器件（如铁氧体、二极管开关移相器等）的产生，数字电子计算机的发展应用以及近代控制理论的出现，电扫描控制波束系统得到了很大发展。归纳起来实现电扫描有两种方法：一种是通过控制阵列天线中各个单元的相位，得到所需的方向图和波束指向，这种雷达，叫做相控阵雷达；另一种方法是通过雷达工作频率的变化来控制阵列天线中各单元的相位，得到所需的方向图和波束指向，这叫频率扫描，采用这种电扫描方法的雷达，叫频扫雷达。60年代中，投入研制的有机载相控阵雷达和地面大型相控阵雷达等。60年代末，由于机载雷达要求向多目标和多功能方向发展，因此研制了全固态化多功能的机载相控阵雷达。70年代开始不久，出现了大功率、大孔径和高精度的大型相控阵雷达系统。在70年代中，人们利用相控阵雷达系统中的电扫描技术，进行电子系统综合化，即扩大其应用范围，用一部相控阵雷达实现多部雷达的功能。

目前，相控阵雷达已发展成为具有多功能、多目标、远距离、高数据率、高可靠性和高自适应能力的一种重要雷达，而且也是唯一可用于对付高动态性能多目标的战略防空雷达，由于其多功能、高性能和体积小（相对多部雷达），也大量应用于飞机和舰船上。

1.1.2 相控阵雷达的基本组成及工作过程

相控阵雷达的基本组成可分为相控阵天线，波束控制计算机，发射机和接收机，激励器，信号处理与录取器，控制计算机等主要部分，外加雷达与计算机之间的接口、外设、显控以及整机电源等设备，其简化组成框图如图1.1.1所示。

相控阵雷达的典型工作过程，是外部指令（可由外部接口或由主控台）输入到控制计算机，控制计算机通过雷达与计算机接口单