



# Radar Data Processing With Applications

---

# 雷达数据处理及应用

何友 修建娟 张晶炜 关欣 等编著

HE You XIU Jianjuan ZHANG Jingwei GUAN Xin

电子信息科技专著出版专项资金资助出版

# 雷达数据处理及应用

**Radar Data Processing With Applications**

何友 修建娟 张晶炜 关欣 等编著

HE You XIU Jianjuan ZHANG Jingwei GUAN Xin

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了国内外多年来雷达数据处理技术的研究进展情况及作者们的研究成果。全书由 15 章组成。主要内容有：雷达数据处理的研究目的、意义、应用领域、历史和现状，状态估计与线性滤波方法，非线性滤波方法，量测数据预处理技术，多目标跟踪中的航迹起始，极大似然类多目标数据互联方法，贝叶斯类多目标数据互联方法，机动目标跟踪，多目标跟踪终结理论与航迹质量管理，无源雷达数据处理技术，相控阵雷达和脉冲多普勒雷达数据处理技术，雷达组网数据处理技术，雷达数据处理仿真技术，雷达数据处理的实际应用，以及本书的回顾、建议与展望。

本书可供从事信息工程、C<sup>3</sup>I 系统、雷达工程、电子对抗、红外、声呐、军事指挥等专业的科技人员阅读和参考，还可作为上述专业的高年级本科生或研究生教材。同时也可供从事激光、机器人、遥感、遥测等领域的工程技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

雷达数据处理及应用/何友等编著. —北京：电子工业出版社，2006.1  
ISBN 7-121-01999-X

I. 雷… II. 何… III. 雷达信号—数据处理 IV. TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 140477 号

责任编辑：王春宁

印 刷：北京天宇星印刷厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销：各地新华书店

开 本：787×1092 1/16 印张：17.5 字数：443 千字

印 次：2006 年 1 月第 1 次印刷

印 数：5 000 册 定价：29.80 元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系。  
联系电话：(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。



**何友**生于1956年10月，男，吉林磐石人。1982年毕业于海军工程大学指控系统专业，获学士学位，1988年在该校火力控制系统专业获硕士学位，1991年10月至1992年11月在德国不伦瑞克工业大学作高级访问学者，1997年在清华大学通信与信息系统专业获博士学位。现为烟台海军航空工程学院院长、教授、博士生导师，中国电子学会会士，中国电子学会雷达分会委员，中国造船学会电子技术委员会委员，总装备部专家组成员，《火力与指挥控制》、《雷达科学与技术》、《舰船电子工程》等杂志编委。主要研究领域有雷达自适应检测方法、多传感器信息融合、多目标跟踪、雷达数据处理、分布检测理论及应用、系统仿真与作战模拟等。在国内外重要刊物和国际会议上发表论文300余篇，有120余篇被SCI、EI和ISTP等国际检索收录，出版专著5部。科研成果获军队科技进步一等奖4项，二等奖2项，三等奖18项。荣立二等功3次，三等功2次，享受政府特殊津贴，曾获第二届“全国百篇优秀博士学位论文奖”和第三届中国科协“求是杰出青年实用工程奖”，1999年入选“百千万人才工程”第一、二层次，2001年被教育部授予“全国优秀教师”称号。2003年被授予“全国留学回国人员先进个人”荣誉称号，并获“全国留学回国人员成就奖”。

# 前 言

雷达数据处理器和雷达信号处理器是现代雷达系统中的两大重要组成部分，雷达接收到的信号先要在信号处理器中进行处理，达到抑制杂波、干扰信号和检测目标信号的目的；然后还要在数据处理器中进行处理，达到最大限度地提取目标坐标信息，以便对控制区域内目标的运动轨迹进行估计，并给出它们在下一时刻的位置推移，实现对目标高精度实时跟踪的目的。近年来，随着硬件、算法和计算机性能等方面的巨大进步，信号处理能力上了一个又一个台阶。这就使量测数据可被用于同时跟踪大量复杂目标，而且这些目标的机动性、目标平台的多样性、密集性和低可观测性也在不断加强，平台间对抗措施的先进性还在不断提高，从而也刺激了雷达数据处理的发展。本书是作者在多年来对雷达数据处理技术研究的基础上总结而成的，较全面、系统地向读者介绍了雷达数据处理技术的发展情况与最新研究成果，以期为国内同行提供一个进一步从事这一领域理论研究和实际应用的基础。

全书共分 15 章，第 1 章介绍了雷达数据处理的研究目的、意义、应用领域、历史和现状，以便使读者对雷达数据处理技术有一个全面的、基本的了解。第 2 章介绍状态估计与线性滤波方法，目的是为读者提供本书以后各章需要的理论基础。第 3 章研究非线性滤波方法。第 4 章讨论量测数据预处理技术，有效的量测数据预处理方法可以降低雷达数据处理的计算量和提高目标的跟踪精度。第 5 章研究了多目标跟踪中的航迹起始理论，具体包括两大类：一类是面向目标的顺序处理技术；另一类是面向量测的批处理方法。第 6 章讨论极大似然类多目标数据互联方法。作为第 6 章的继续，第 7 章研究贝叶斯类多目标数据互联方法。第 8 章研究机动目标跟踪方法，并分为具有机动检测的跟踪算法和自适应跟踪算法两大类进行论述。第 9 章讨论多目标跟踪终结技术与航迹管理技术。第 10 章研究无源雷达数据处理技术，同时还对无源雷达目标跟踪的优点和特点进行了阐述。第 11 章介绍相控阵技术在现代雷达系统中的应用情况、相控阵雷达数据处理的功能和特点；同时还介绍了脉冲多普勒（PD）雷达的一些相关知识和数据处理方法。第 12 章讨论雷达组网数据处理技术。第 13 章讨论雷达数据处理仿真技术，包括系统仿真的基础知识和进行 Monte Carlo 仿真实验时随机数的产生方法，同时还给出了雷达数据处理算法的仿真实例，以帮助读者能更好地理解系统仿真技术在雷达数据处理技术研究中的应用。第 14 章介绍雷达数据处理的实际应用。第 15 章回顾和总结本书的研究成果，并对某些问题提出进一步的研究建议。

本书由烟台海军航空工程学院何友、修建娟、张晶炜、关欣、熊伟、苏峰、董云龙、衣晓编著。我们知道，雷达数据处理技术是随着武器系统和设备、信号处理技术等的发展而不断发展的，由于篇幅的限制，本书不可能对这些发展做出统览无余的介绍。为此，我们在每章的最后都进行了归纳和总结，指出一些重要的新发展供读者进一步研究参考。同时，由于编著者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

# 致 谢

本书在撰写出版过程中，得到了国内著名电子学专家郭桂蓉院士、毛二可院士的推荐和帮助，作者在此向他们表示感谢。

感谢海军航空工程学院王国宏教授与作者进行了很多有益的学术交流和讨论，并在百忙之中审阅本书的手稿，提出了非常宝贵的意见。在此，对王国宏教授表示深深的谢意。

书中引用了一些作者的论著及研究成果，在此向他们表示深深的谢意。笔者同样要感谢海军航空工程学院的领导、同仁和电子工业出版社，特别是电子工业出版社的王春宁编辑，正是由于他们的大力支持才保证了本书按期高质量出版。

在此，我还要感谢我的妻子潘丽娜女士，感谢她数十年来对我事业的理解和支持，感谢她在生活中给予了我无微不至的关心和照顾，这些都是我完成本书的基础。

作者最后还要感谢电子信息科技专著出版专项资金委员会对本书出版的资助。

何 友

2005年9月26日

于烟台海军航空工程学院

# 目 录

|   |      |
|---|------|
| 第 1 章 概述  | (1)  |
| 1.1 雷达数据处理的目的和意义  | (1)  |
| 1.2 雷达数据处理中的基本概念  | (2)  |
| 1.3 雷达数据处理技术研究的历史与现状                                      | (5)  |
| 1.4 本书的范围和概貌  | (7)  |
| 参考文献  | (10) |
| 第 2 章 状态估计与线性滤波方法   | (12) |
| 2.1 引言  | (12) |
| 2.2 参数估计  | (12) |
| 2.2.1 参数估计的概念   | (12) |
| 2.2.2 四种基本估计方法  | (13) |
| 2.2.3 估计性质  | (15) |
| 2.2.4 静态向量情况下的参数估计  | (17) |
| 2.3 卡尔曼滤波   | (21) |
| 2.3.1 系统模型  | (21) |
| 2.3.2 滤波模型  | (22) |
| 2.3.3 滤波器的初始化   | (25) |
| 2.3.4 稳态卡尔曼滤波   | (28) |
| 2.3.5 卡尔曼滤波算法应用举例   | (28) |
| 2.3.6 卡尔曼滤波应用中应注意的一些问题                                    | (30) |
| 2.4 $\alpha$ - $\beta$ 与 $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ 滤波 | (31) |
| 2.4.1 $\alpha$ - $\beta$ 滤波器                              | (32) |
| 2.4.2 $\alpha$ - $\beta$ 滤波算法的应用举例                        | (34) |
| 2.4.3 $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ 滤波器                   | (35) |
| 2.5 其他线性滤波技术  | (36) |
| 2.5.1 两点外推滤波  | (36) |
| 2.5.2 线性自回归滤波   | (36) |
| 2.6 卡尔曼滤波与其他线性滤波方法性能比较                                    | (37) |
| 2.7 状态估计的一致性检验  | (38) |
| 2.7.1 状态估计误差一致性检验   | (38) |
| 2.7.2 新息的一致性检验  | (39) |
| 2.7.3 新息的白度检验   | (39) |
| 2.7.4 滤波一致性检验的应用举例  | (39) |

|                                      |             |
|--------------------------------------|-------------|
| 2.8 小结 .....                         | (40)        |
| 参考文献 .....                           | (40)        |
| <b>第3章 非线性滤波方法 .....</b>             | <b>(42)</b> |
| 3.1 引言 .....                         | (42)        |
| 3.2 扩展卡尔曼滤波 .....                    | (42)        |
| 3.2.1 滤波模型 .....                     | (42)        |
| 3.2.2 线性化 EKF 滤波的误差补偿 .....          | (45)        |
| 3.2.3 扩展卡尔曼滤波应用中应注意的一些问题 .....       | (46)        |
| 3.3 不敏卡尔曼滤波 .....                    | (46)        |
| 3.3.1 不敏变换 .....                     | (46)        |
| 3.3.2 滤波模型 .....                     | (47)        |
| 3.4 粒子滤波 .....                       | (48)        |
| 3.4.1 系统状态方程和传感器测量模型 .....           | (48)        |
| 3.4.2 滤波模型 .....                     | (48)        |
| 3.4.3 EKF、UKF、PF 三种非线性滤波算法应用举例 ..... | (49)        |
| 3.5 基于修正极坐标的非线性滤波方法 .....            | (51)        |
| 3.5.1 系统模型 .....                     | (52)        |
| 3.5.2 滤波模型 .....                     | (55)        |
| 3.5.3 利用修正的极坐标系对目标进行被动跟踪应用举例 .....   | (55)        |
| 3.6 小结 .....                         | (57)        |
| 参考文献 .....                           | (57)        |
| <b>第4章 量测数据预处理技术 .....</b>           | <b>(60)</b> |
| 4.1 引言 .....                         | (60)        |
| 4.2 坐标变换 .....                       | (60)        |
| 4.2.1 坐标系 .....                      | (60)        |
| 4.2.2 坐标变换 .....                     | (64)        |
| 4.2.3 几种常用坐标系的变换关系 .....             | (66)        |
| 4.2.4 几种常用坐标系中的跟踪问题 .....            | (70)        |
| 4.2.5 跟踪坐标系与滤波状态变量选择 .....           | (75)        |
| 4.3 野值剔除技术 .....                     | (76)        |
| 4.3.1 野值的定义、成因及分类 .....              | (76)        |
| 4.3.2 野值的判别方法 .....                  | (77)        |
| 4.4 数据压缩技术 .....                     | (78)        |
| 4.4.1 单雷达的数据压缩 .....                 | (78)        |
| 4.4.2 多雷达系统中的数据压缩 .....              | (79)        |
| 4.5 小结 .....                         | (80)        |
| 参考文献 .....                           | (81)        |
| <b>第5章 多目标跟踪中的航迹起始 .....</b>         | <b>(83)</b> |
| 5.1 引言 .....                         | (83)        |



|              |                             |              |
|--------------|-----------------------------|--------------|
| 5.2          | 航迹起始波门的形状和尺寸 .....          | (83)         |
| 5.2.1        | 椭圆(球)波门 .....               | (83)         |
| 5.2.2        | 矩形波门 .....                  | (85)         |
| 5.2.3        | 扇形波门 .....                  | (86)         |
| 5.3          | 航迹起始算法 .....                | (87)         |
| 5.3.1        | 直观法 .....                   | (87)         |
| 5.3.2        | 逻辑法 .....                   | (87)         |
| 5.3.3        | 修正的逻辑法 .....                | (89)         |
| 5.3.4        | Hough 变换法 .....             | (89)         |
| 5.3.5        | 修正的 Hough 变换法 .....         | (92)         |
| 5.3.6        | 基于 Hough 变换和逻辑的航迹起始算法 ..... | (93)         |
| 5.4          | 航迹起始算法的比较与分析 .....          | (93)         |
| 5.5          | 航迹起始中的有关问题讨论 .....          | (97)         |
| 5.6          | 小结 .....                    | (98)         |
|              | 参考文献 .....                  | (98)         |
| <b>第 6 章</b> | <b>极大似然类多目标数据互联方法 .....</b> | <b>(100)</b> |
| 6.1          | 引言 .....                    | (100)        |
| 6.2          | 航迹分叉法 .....                 | (100)        |
| 6.3          | 联合极大似然算法 .....              | (102)        |
| 6.4          | 0-1 整数规划法 .....             | (104)        |
| 6.5          | 广义相关法 .....                 | (106)        |
| 6.6          | 几种极大似然类算法性能分析 .....         | (108)        |
| 6.7          | 小结 .....                    | (109)        |
|              | 参考文献 .....                  | (109)        |
| <b>第 7 章</b> | <b>贝叶斯类多目标数据互联方法 .....</b>  | <b>(111)</b> |
| 7.1          | 引言 .....                    | (111)        |
| 7.2          | 最近邻域标准滤波器 .....             | (111)        |
| 7.3          | 概率数据互联算法 .....              | (111)        |
| 7.3.1        | 状态更新与协方差更新 .....            | (112)        |
| 7.3.2        | 互联概率计算 .....                | (114)        |
| 7.3.3        | 性能分析 .....                  | (116)        |
| 7.4          | 联合概率数据互联算法 .....            | (119)        |
| 7.4.1        | JPDA 算法的基本模型 .....          | (119)        |
| 7.4.2        | 联合事件概率的计算 .....             | (123)        |
| 7.4.3        | 状态估计协方差的计算 .....            | (125)        |
| 7.5          | 最优贝叶斯算法 .....               | (127)        |
| 7.6          | 多假设法 .....                  | (128)        |
| 7.6.1        | 假设的产生 .....                 | (128)        |
| 7.6.2        | 概率计算 .....                  | (129)        |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 7.6.3 假设的简化技巧 .....             | (129)        |
| 7.7 性能分析 .....                  | (130)        |
| 7.8 小结 .....                    | (131)        |
| 参考文献 .....                      | (132)        |
| <b>第8章 机动目标跟踪 .....</b>         | <b>(134)</b> |
| 8.1 引言 .....                    | (134)        |
| 8.2 具有机动检测的跟踪算法 .....           | (134)        |
| 8.2.1 可调白噪声模型 .....             | (135)        |
| 8.2.2 变维滤波算法 .....              | (136)        |
| 8.2.3 输入估计法 .....               | (137)        |
| 8.3 自适应跟踪算法 .....               | (139)        |
| 8.3.1 多模型算法 .....               | (139)        |
| 8.3.2 Singer 模型算法 .....         | (140)        |
| 8.3.3 当前统计模型算法 .....            | (143)        |
| 8.3.4 交互式多模型算法 .....            | (144)        |
| 8.3.5 Jerk 模型算法 .....           | (146)        |
| 8.4 机动目标跟踪算法性能比较 .....          | (148)        |
| 8.4.1 仿真环境与参数设置 .....           | (148)        |
| 8.4.2 仿真结果与分析 .....             | (150)        |
| 8.5 小结 .....                    | (153)        |
| 参考文献 .....                      | (154)        |
| <b>第9章 多目标跟踪终结理论与航迹管理 .....</b> | <b>(156)</b> |
| 9.1 引言 .....                    | (156)        |
| 9.2 多目标跟踪终结理论 .....             | (156)        |
| 9.2.1 序列概率比检验 (SPRT) 算法 .....   | (156)        |
| 9.2.2 跟踪门方法 .....               | (157)        |
| 9.2.3 代价函数法 .....               | (157)        |
| 9.2.4 Bayes 算法 .....            | (158)        |
| 9.2.5 全邻 Bayes 算法 .....         | (159)        |
| 9.2.6 算法性能分析 .....              | (159)        |
| 9.3 航迹管理 .....                  | (161)        |
| 9.3.1 航迹号管理 .....               | (161)        |
| 9.3.2 航迹质量管理 .....              | (166)        |
| 9.4 小结 .....                    | (170)        |
| 参考文献 .....                      | (170)        |
| <b>第10章 无源雷达数据处理技术 .....</b>    | <b>(172)</b> |
| 10.1 引言 .....                   | (172)        |
| 10.2 有源雷达的局限性及无源雷达的优点 .....     | (172)        |
| 10.3 无源雷达数据处理技术 .....           | (174)        |

|               |  |              |
|---------------|--|--------------|
| 10.3.1        | 相位变化率法 .....                           | (174)        |
| 10.3.2        | 多普勒变化率和方位联合定位 .....                    | (178)        |
| 10.3.3        | 多模型法 .....                             | (180)        |
| 10.4          | 小结 .....                               | (183)        |
|               | 参考文献 .....                             | (184)        |
| <b>第 11 章</b> | <b>相控阵和脉冲多普勒雷达数据处理 .....</b>           | <b>(186)</b> |
| 11.1          | 引言 .....                               | (186)        |
| 11.2          | 相控阵雷达数据处理 .....                        | (186)        |
| 11.2.1        | 相控阵雷达系统概述 .....                        | (186)        |
| 11.2.2        | 相控阵雷达数据处理系统的功能和特点 .....                | (188)        |
| 11.2.3        | 相控阵雷达的数据处理 .....                       | (189)        |
| 11.3          | PD 雷达数据处理 .....                        | (196)        |
| 11.3.1        | PD 雷达系统概述 .....                        | (196)        |
| 11.3.2        | PD 雷达数据的提取 .....                       | (197)        |
| 11.3.3        | PD 雷达滤波的典型算法 .....                     | (199)        |
| 11.4          | 小结 .....                               | (202)        |
|               | 参考文献 .....                             | (202)        |
| <b>第 12 章</b> | <b>雷达组网数据处理技术 .....</b>                | <b>(204)</b> |
| 12.1          | 引言 .....                               | (204)        |
| 12.2          | 雷达网的设计与分析 .....                        | (204)        |
| 12.2.1        | 雷达网性能评价指标 .....                        | (204)        |
| 12.2.2        | 雷达网优化布站 .....                          | (206)        |
| 12.3          | 单基地雷达组网数据处理 .....                      | (209)        |
| 12.3.1        | 单基地雷达组网数据处理 .....                      | (209)        |
| 12.3.2        | 单基地雷达组网的状态估计 .....                     | (210)        |
| 12.4          | 多基地雷达组网数据处理 .....                      | (211)        |
| 12.4.1        | 多基地雷达系统的跟踪原理 .....                     | (211)        |
| 12.4.2        | 多基地雷达组网系统的观测方程 .....                   | (211)        |
| 12.4.3        | 多基地跟踪系统数据处理的一般过程 .....                 | (212)        |
| 12.5          | 航迹关联 .....                             | (213)        |
| 12.6          | 误差配准 .....                             | (215)        |
| 12.6.1        | 目标位置已知的误差配准 .....                      | (215)        |
| 12.6.2        | 实时质量控制 (RTQC) 算法 .....                 | (217)        |
| 12.6.3        | 最小二乘 (LS) 算法 .....                     | (218)        |
| 12.6.4        | 广义最小二乘 (GLS) 算法 .....                  | (219)        |
| 12.6.5        | 基于 ECEF 坐标系的广义最小二乘 (ECEF-GLS) 算法 ..... | (220)        |
| 12.7          | 小结 .....                               | (224)        |
|               | 参考文献 .....                             | (224)        |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>第 13 章 雷达数据处理仿真技术</b> .....  | (226) |
| 13.1 引言 .....                   | (226) |
| 13.2 系统仿真技术基础 .....             | (226) |
| 13.2.1 系统仿真技术的基本概念 .....        | (226) |
| 13.2.2 随机噪声的数字仿真 .....          | (228) |
| 13.3 雷达数据处理算法仿真 .....           | (232) |
| 13.3.1 目标运动模型的仿真 .....          | (232) |
| 13.3.2 观测过程的仿真 .....            | (235) |
| 13.3.3 跟踪滤波及航迹管理 .....          | (236) |
| 13.4 算法仿真示例 .....               | (241) |
| 13.5 小结 .....                   | (247) |
| 参考文献 .....                      | (248) |
| <b>第 14 章 雷达数据处理的实际应用</b> ..... | (249) |
| 14.1 引言 .....                   | (249) |
| 14.2 在空中交通管制系统中的应用 .....        | (249) |
| 14.2.1 用途、组成和要求 .....           | (249) |
| 14.2.2 雷达数据处理结构 .....           | (250) |
| 14.2.3 空中交通管制实例 .....           | (252) |
| 14.3 在船用导航雷达中的应用 .....          | (254) |
| 14.4 在海上监视系统中的应用 .....          | (256) |
| 14.4.1 用途、组成和要求 .....           | (256) |
| 14.4.2 海上控制系统的结构 .....          | (257) |
| 14.5 在防空系统中的应用 .....            | (257) |
| 14.6 在陆基对空警戒雷达中的应用 .....        | (259) |
| 14.7 在机载预警雷达中的应用 .....          | (259) |
| 14.8 在舰载警戒火控雷达系统中的应用 .....      | (260) |
| 14.9 小结 .....                   | (261) |
| 参考文献 .....                      | (261) |
| <b>第 15 章 回顾、建议与展望</b> .....    | (264) |
| 15.1 引言 .....                   | (264) |
| 15.2 研究成果回顾 .....               | (264) |
| 15.3 问题与建议 .....                | (266) |
| 15.4 研究方向展望 .....               | (267) |

# 第1章 概述

## 1.1 雷达数据处理的目的和意义

现代雷达系统一般都包含雷达信号处理器和雷达数据处理器这两大重要组成部分<sup>[1]</sup>，如图 1.1 所示。信号处理器是用来检测目标并利用一定的方法来抑制由地（海）面杂波、气象、射频干扰、噪声源和人为干扰所产生的不希望有的信号<sup>[2~4]</sup>，处理后的视频输出信号再与某个门限比较。若信号超过检测门限，便判断为“发现”目标，然后把目标信号输送到数据录取器，以便测量目标的距离、角度（方位、俯仰）、径向速度以及其他一些目标特性。数据录取器输出的便是目标观测值的估计，称为点迹<sup>[2]</sup>。而数据录取器一般是由计算机来实现的，由数据录取器输出点迹（或量测数据），并在数据处理器中完成各种相关处理。

雷达数据处理包括很广泛的内容，这里指的是雷达在取得目标的位置、运动参数数据（如径向距离、径向速度、方位和俯仰角等）后进行的互联、跟踪、滤波、平滑、预测等运算<sup>[5~8]</sup>。对雷达测量数据进行互联、跟踪、滤波、平滑、预测等处理，可以有效地抑制测量过程中引入的随机误差，精确估计目标位置和有关的运动参数（如速度和加速度等），预测目标下一时刻的位置<sup>[9~11]</sup>，并形成稳定的目标航迹。因而，概括来讲雷达数据处理的目的是最大限度地提取目标的坐标信息，以便对控制区域内目标的运动轨迹进行估计，并给出它们在下一时刻的位置推移，实现对目标的高精度实时跟踪。从对雷达测量数据进行处理的层次来讲，如果把雷达信号处理看成是第一次处理，那么雷达数据处理就是第二次处理，而拦截判定、拦截指令计算、拦截方式选择和杀伤概率计算等则可看做第三次处理。近年来，随着硬件、算法和计算机性能等方面的巨大进步，信号处理能力上了一个又一个台阶，这就使量测数据可被用于同时跟踪大量复杂目标，从而也刺激了雷达数据处理技术的发展，这也正是我们要写这本书的原因。

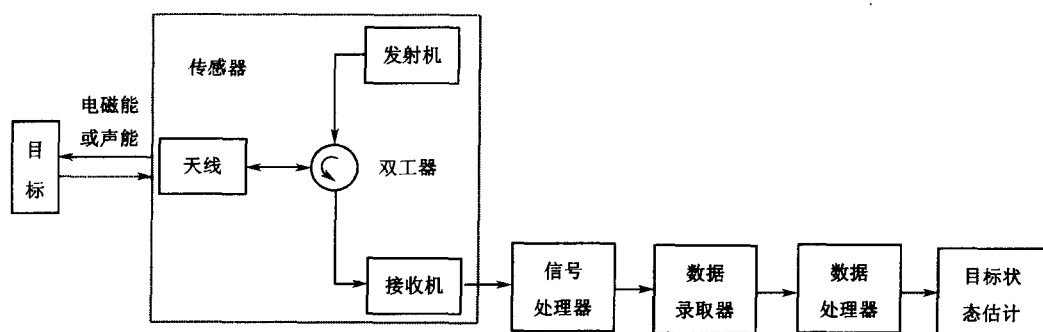


图 1.1 雷达系统简化框图

## 1.2 雷达数据处理中的基本概念

下面我们简要介绍一下雷达数据处理中的几个基本概念。

### 1. 量测

量测是指与目标状态有关的受噪声污染的观测值<sup>[12]</sup>，量测有时也称为测量或观测。量测通常并不是传感器的原始数据点，而是经过信号处理后的数据录取器的输出。量测主要包括以下几种：

- (1) 传感器所测得的目标距离、方位角、俯仰角；
- (2) 两个传感器之间的到达时间差；
- (3) 目标辐射的窄带信号频率；
- (4) 观测的两个传感器之间的频率差（由多普勒频移产生）；
- (5) 信号强度等。

量测用方程可表示为：

$$z(k) = H(k)X(k) + W(k) \quad (1.1)$$

其中： $H(k)$ 为量测矩阵， $X(k)$ 为状态向量， $W(k)$ 为量测噪声序列，一般假定其为零均值的附加高斯白噪声序列。

在现代战场环境中，由于多种因素的影响，量测有可能是来自目标的正确量测，也有可能是来自杂波、虚假目标、干扰目标的错误量测，而且还有可能存在漏检情况，也就是说量测通常具有不确定性。概括来讲造成量测不确定性的原因主要有以下几种：

- (1) 检测过程中的随机虚警；
- (2) 由于所感兴趣目标附近的虚假反射体或辐射体所产生的杂波；
- (3) 干扰目标；
- (4) 诱饵等。

### 2. 数据互联

数据互联是建立某时刻传感器量测数据和其他时刻量测数据（或航迹）的关系，以确定这些量测数据是否来自同一个目标的处理过程（或确定正确的点迹和航迹配对的处理过程）。数据互联问题和跟踪问题是雷达数据处理中的两大基本问题，在单目标情况下，只涉及跟踪问题，在多目标情况下，二者都要涉及。概括来讲，按照互联的对象的不同，数据互联问题可分为以下几类：

- (1) 量测与量测的互联或点迹与点迹的互联（航迹起始）；
- (2) 量测与航迹的互联或点迹与航迹的互联（航迹保持或航迹更新）；
- (3) 航迹与航迹的互联或称航迹关联（航迹融合）。

从数学上来看，数据互联问题可分为以下两种模型：

- (1) 确定性模型，其中量测源是确定的，并忽略它未必是正确的这一事实；
- (2) 概率模型，它利用贝叶斯准则计算各个事件的概率，然后利用这些概率值适当修正状态估计算法。

### 3. 航迹

航迹是由来自同一个目标的量测集合所估计的目标状态形成的轨迹<sup>[12,13]</sup>。与航迹有关的概念还包括以下几个：

(1) 航迹号。航迹号是给航迹规定的编号，与一个给定航迹相联系的所有参数都以其航迹号作参考；

(2) 航迹质量。航迹质量表示航迹可靠性程度的度量。通过航迹质量管理，可以及时、准确地起始航迹以建立新目标档案，也可以及时、准确地撤销航迹以消除多余目标档案；

(3) 可能航迹。可能航迹是由单个测量点组成的航迹；

(4) 试验航迹。由两个或多个测量点组成的并且航迹质量数较低的航迹统称为试验航迹，它可能是目标航迹，也可能是随机干扰，即虚假航迹。可能航迹完成初始相关后就转化成试验航迹或撤销航迹，也有人把试验航迹称为暂时航迹；

(5) 确认航迹。确认航迹是具有稳定输出或航迹质量数超过某一定值的航迹，也称做可靠航迹或稳定航迹，它通常被认为是真实目标航迹；

(6) 撤销航迹。当航迹质量低于某一定值或是由孤立的随机干扰点组成时，称该航迹为撤销航迹，而这一过程称为航迹撤销或航迹终止。航迹撤销的主要任务是及时删除假航迹而保留真航迹；

(7) 航迹起始响应时间。航迹起始响应时间是指目标进入雷达威力区到建立该航迹的时间，通常用雷达扫描次数作为单位。快速航迹起始一般为 3~4 个雷达扫描周期，慢速航迹起始一般为 8~10 个扫描周期。

### 4. 相关波门

相关波门（或相关域）是指以被跟踪目标的预测位置为中心，用来确定该目标的观测值可能出现范围的一块区域。区域大小由正确接收回波的概率来确定，也就是在确定波门的形状和大小时应使真实量测以很高的概率落入波门内，同时又要使相关波门内的无关点迹的数量不是很多。

### 5. 跟踪

跟踪是指对来自目标的量测值进行处理，以便保持对目标现时状态的估计。典型的目标状态包括<sup>[1]</sup>：

(1) 运动分量（位置、速度和加速度等）；

(2) 其他分量（辐射信号的强度、射频频率、脉宽和脉冲重复频率等“特征”信息）；

(3) 常数或者缓慢变化的参数（耦合系数、电磁波或声波的传播速度等）。

### 6. 多目标跟踪

多目标跟踪是指同时对来自多个目标的量测值进行处理，以便保持对多个目标现时状态的估计。

## 7. 动态模型

动态模型是目标运动规律的假设, 有了这些假设我们才可以获得目标的状态方程。若假设目标在平面内做匀速直线运动, 则离散时间系统下  $t_k$  时刻目标的状态  $(x_k, y_k)$  可表示为:

$$x_k = x_0 + v_x t_k = x_0 + v_x kT \quad (1.2)$$

$$y_k = y_0 + v_y t_k = y_0 + v_y kT \quad (1.3)$$

其中:  $(x_0, y_0)$  为初始时刻目标的位置,  $v_x$  和  $v_y$  分别为目标在  $x$  轴和  $y$  轴的速度,  $T$  为采样间隔。

式 (1.2) 和式 (1.3) 用递推形式可表示为:

$$x_{k+1} = x_k + v_x T = x_k + \dot{x}_k T \quad (1.4)$$

$$y_{k+1} = y_k + v_y T = y_k + \dot{y}_k T \quad (1.5)$$

目标状态方程 (或称动态方程或系统方程) 用矩阵形式可表示为:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k) \quad (1.6)$$

其中:

$$\mathbf{X}(k) = [x_k \quad \dot{x}_k \quad y_k \quad \dot{y}_k]' \quad (1.7)$$

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

分别为状态向量和系统状态转移矩阵。

若假设目标在平面内做匀加速直线运动, 则目标的状态  $(x_k, y_k)$  用递推形式可表示为:

$$x_{k+1} = x_k + (v_{xk} + aT)T = x_k + \dot{x}_k T + \ddot{x}_k T^2 \quad (1.9)$$

$$y_{k+1} = y_k + (v_{yk} + aT)T = y_k + \dot{y}_k T + \ddot{y}_k T^2 \quad (1.10)$$

目标状态方程用矩阵形式仍可表示为:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k) \quad (1.11)$$

这里

$$\mathbf{X}(k) = [x_k \quad \dot{x}_k \quad \ddot{x}_k \quad y_k \quad \dot{y}_k \quad \ddot{y}_k]' \quad (1.12)$$

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & T^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

同理, 当目标在三维空间中做匀速和匀加速运动时, 其对应的状态向量和系统状态转移矩阵分别为:

$$\mathbf{X}(k) = [x_k \quad \dot{x}_k \quad y_k \quad \dot{y}_k \quad z_k \quad \dot{z}_k]' \quad (1.14)$$



$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

和

$$X(k) = [x_k \quad \dot{x}_k \quad \ddot{x}_k \quad y_k \quad \dot{y}_k \quad \ddot{y}_k \quad z_k \quad \dot{z}_k \quad \ddot{z}_k]' \quad (1.16)$$

$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & T^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T & T^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

目标状态方程的一般形式可表示为：

$$X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)u(k) + V(k) \quad (1.18)$$

其中： $G(k)$ 为输入控制项矩阵， $u(k)$ 为已知输入或控制信号， $V(k)$ 为过程噪声序列，通常假定为零均值的附加高斯白噪声序列，且假定过程噪声序列与量测噪声序列及目标初始状态是相互独立的。

## 8. 机动

机动是指目标运动出现了不可预测的变化，比如飞机突然加速、转弯等。有关机动目标跟踪问题将在本书第 8 章作专题讨论。

## 1.3 雷达数据处理技术研究的历史与现状

最早的雷达数据处理方法是 19 世纪初叶 Gauss（高斯）提出的最小二乘法。1795 年，高斯首次运用最小二乘法预测神谷星轨道，开创了用数学方法处理观测和实验数据的科学领域。这种方法经后人的不断修改和完善，今天已经具有适于实时运算的形式。现代滤波理论是建立在概率论和随机过程理论的基础之上的。20 世纪 40 年代初第一代火控雷达的诞生开始了单目标跟踪雷达的发展史，当时采用的是波门式距离跟踪和圆锥扫描式角度跟踪，而在这个时期，Wiener（维纳）等人提出的维纳滤波理论则开辟了现代滤波理论的研究领域。20 世纪 40 年代，维纳滤波一提出就被应用于通信、雷达和控制等各个领域，并取得了巨大成功。

由于跟踪精度和抗干扰的要求，20 世纪 50 年代又出现了单脉冲雷达，该雷达可以说是