

# 雷达数据处理

## 第一卷

[意] A.费利那 著  
F.A.斯塔德

国防工业出版社

# 雷达数据处理

(第一卷)

〔意〕 A. 费利那 F. A. 斯塔德 著

匡永胜 张祖稷 等译

谢成学 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书系统论述了雷达数据处理的基本原理和方法, 讨论了雷达和雷达网的跟踪、对雷达数据处理器的计算机模拟和应用实例。

全书分两卷。本书为第一卷, 计四章。第一章绪论简介了雷达数据处理的范围、结构和应用, 第二章复习必要的数学知识, 概括介绍估计和滤波理论, 第三章讨论边跟踪边扫描系统执行的功能和 $\alpha-\beta$ 算法, 第四章研究跟踪算法和自适应滤波器。第二卷讨论雷达网系统、计算机模拟及其应用。各章末均附有大量参考文献。

本书论题精当而新颖, 是目前对雷达数据处理和跟踪问题进行系统论述的初次尝试。

本书可供高等院校雷达数据处理专业的高年级学生和研究生使用, 也可作为在职研究生的进修教程, 还可供从事雷达、通信等电子工程的有关技术人员和教师参考。

RADAR DATA PROCESSING (VOLUME I)

A. Farina and F. A. Studer

Research Studies Press LTD

1985

\*

## 雷达数据处理

(第一卷)

〔意〕A. 费利那 F. A. 斯塔德 著

匡永胜 张祖稷 等译

谢成学 校

责任编辑 郑 廷

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168 1/32 印张 9 1/4 238 千字

1988年2月第一版 1988年2月第一次印刷 印数: 1,000 册

ISBN7-118-00260-7/TN48 定价: 2.10元

## 译 者 的 话

雷达数据处理和雷达信号处理一样，是雷达技术领域中的一个重要方面。随着大规模集成电路、计算机和雷达应用技术的迅速发展，近几年来，人们对雷达数据处理的研究予以极大的关注，在国外进展很快。雷达数据处理技术的发展，必将在很大程度上提高雷达的使用性能和价值，从而反过来推动雷达技术的发展。

雷达数据处理连接在雷达信号处理之后，可以看成是雷达信号处理的后处理过程，但其处理时间较长。它可以提供有用目标的位置、速度、机动情况和属性识别，其精度和可靠性都高于雷达的一次观测。此外，它还能进一步消除由剩余杂波等造成的虚假检测，改善雷达信号处理功能。雷达数据处理是现代监视、跟踪系统不可或缺的部分。因此，用于交通管制和防空的现代监视系统，都必需有高水平的雷达数据处理器，才能充分利用雷达所获得的各种信息，使雷达的使用价值和性能得以提高。可以说，雷达数据处理是在雷达信号处理发展的同时必然要发展的一项技术。

关于雷达信号处理，已经出版了不少专著。但就雷达数据处理而言，目前尚无系统、全面和统一的论述。A. 费利那和 F. A. 斯塔德的《雷达数据处理》一书，可说是这方面进行的有益尝试，它将有助于填补这方面的空白。该书论题精当新颖，系统性强，既有必要的数学基础和理论，又有实际的分析和设计，还有计算机模拟和应用实例。读者在掌握了本书的内容之后，当能进行雷达数据处理器的研究和设计。为此，我们尽快组织人力翻译出版本书，谨把她奉献给雷达、通信界的同事们。

在阅读本书之前，读者应熟悉雷达技术、动态系统理论、概率和随机过程，以及计算机程序编制的基本概念。

全书分两卷，本书为第一卷。第一章由匡永胜同志翻译，于锁祥同志翻译了第二章，第三章由张祖稷、孙龙祥同志翻译，周心田、罗真林同志翻译了第四章。全书译稿由谢成学同志统一作了校对修订。另外，在本书成书过程中段中同志们曾提出不少宝贵意见，做了不少工作，在此一并致以谢忱。

由于我们水平有限，加之成书时间仓促，译文中不免存在不少错误或欠当之处，恳切希望广大读者予以批评指正。

## 前 言

近几年来，人们对雷达系统中的自动数据处理的研究和应用予以极大的关注。之所以如此，是因为在交通管制和防空应用中用雷达作传感器的现代监视系统，需要快速而又高度精确的数据，然后进行处理。

雷达数据处理可以提供每个感兴趣目标的位置、速度、机动情况和属性识别，其精度和可靠性比一次观测雷达报告得到的要高。而且通过消除由剩余杂波等造成的虚假检测，雷达数据处理还能提高信号处理功能。

雷达数据处理适用于单基地和双基地传感器，它们的天线波束或者作机械扫描，或者作电子扫描。相控阵雷达是天线波束电扫传感器的合适例子。在这种情况下，数据处理器根据要求（例如，要在目标急剧变动的方向上进行更多的观测）参与雷达功能的安排。今天，对把几个往往具有互补特性的雷达连成网以便得到优异性能，这也很有实际意义。

在单个雷达系统中，数据处理靠数字计算机进行，它安插在点迹录取器与最靠近显示器之间的地方。雷达数据处理的功能是在若干次雷达扫描时间上进行，而信号处理却是在同一次扫描中的若干相邻雷达观测中进行。至于在雷达网中，数据处理功能可集中于某个主中心或分布于各个雷达站。

雷达数据处理可以看成是一种算法。当用于连续扫描期间得到的雷达检测时，这种算法可以：

- 识别属于同一目标的逐次检测的性质。
- 估计目标的运动学参数（位置、速度和加速度），从而建立所谓目标航迹。

- 外推航迹参数。
- 鉴别不同目标，进而建立各个目标的航迹。
- 鉴别虚假检测（由人为干扰或自然干扰所致）和真实目标。

• 自适应地精确设定信号处理器的门限，使雷达根据扫描-扫描间不断刷新的虚假检测图上的内容，在不同的空间方向上改变灵敏度。

• 确定相控阵雷达的航迹终止，以便以恒定的精度跟踪机动目标，并在执行搜索观测或其他雷达功能时以最佳方式插入跟踪。

• 有效处理由雷达网中观测同一空域的各个雷达站来提供检测结果或航迹，以便得到较好的航迹图。

本书旨在对雷达数据处理理论作一便于理解的处理，使得实际雷达工程师能凭以进行分析和设计。早先提出的理论已为各种应用所证实。有一整章阐述雷达数据处理器的主要部件——跟踪滤波器的数字计算机模拟，另一章则致力于阐述雷达数据处理用于民用和军用系统那些实际感兴趣的情况。

本书论题精当而且现代化，可以作为大学生和研究生的通讯和电子工程教程，也可作为企业中研究生雇员的继续进修教程。本教程假定读者熟悉雷达技术、动态系统理论、概率和随机过程以及计算机程序编制的基本概念。

尽管近二十年来对于跟踪这个题目写有大量论文，但就作者所知，在公开文献中至今尚无有关这一论题的统一和系统的论述。我们希望本书会有助于填补这方面的空白。

为叙述方便起见，本书分成两卷。第一卷介绍雷达数据处理，复习必要的数学方法，然后再详尽地讨论跟踪问题。相反，第二卷则比较专业化。它先讲雷达网，然后讨论如何使用计算机模拟来估价雷达数据处理的性能，最后是应用举例。因此，第一卷包括基本的背景知识，而第二卷对实际雷达工程师是不可缺少的。

在篇章结构上，第一卷划分为四章。引言部分叙述雷达系统数据处理的范围，描述了机械扫描雷达和相控阵雷达中雷达数据处理的一般结构以及它与其他分系统的连接。然后粗略地提出了把若干雷达系统构成雷达网的一些好处和有关问题，接着研究雷达数据处理的核心——跟踪滤波器。跟踪滤波器可能有很多形式，选择合适的算法通常是在计算资源和工作要求之间进行折衷。最后，例举了雷达数据处理在空中交通管制和监视系统中的若干典型应用。

由于雷达工程师不如控制系统工程师那样熟悉雷达数据处理所需要的数学工具，所以用第二章整整一章来概括介绍估计和滤波理论，这种理论显示出具有最佳方式可据以导出跟踪算法。

第三章讨论所谓边扫描边跟踪系统，讲的是机械扫描雷达中进行的的处理，详细分析和说明了边扫描边跟踪系统执行的功能（航迹起始、航迹形成和相关逻辑），还介绍了第一个用于跟踪目标的 $\alpha-\beta$ 算法。此外，也对雷达报告和已处理数据的计算机编制作了详细说明。

第四章是本书的主要部分之一。这一章研究了若干滤波算法以及怎样把它们用于可能发生的各种工作条件。先提出一种基于卡尔曼滤波理论的灵活算法，作为推导自适应滤波器的基础。自适应滤波器能跟踪机动目标，并在航迹形成中把特定目标与其他目标或假检测区分开来。如果把上述各种算法与利用相控阵雷达进行有源跟踪以及测定径向速度有关的算法合起来，就构成了一整套完整的跟踪算法。本章中还有一节专门讲述如何利用双基地雷达进行跟踪。

第二卷讨论了另外一些有关的问题，例如雷达网系统，模拟方法及其应用。在各章之末均按年月顺序列出了参考文献，读者可以从中寻求任何特定课题的进一步细节。

A. 费利那  
F. A. 斯塔德



# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....               | 1  |
| 1.1 雷达系统中的数据处理 .....       | 1  |
| 1.1.1 雷达的分类 .....          | 1  |
| 1.1.2 雷达技术概述 .....         | 5  |
| 1.1.3 边扫描边跟踪雷达系统的概念 .....  | 11 |
| 1.2 相控阵雷达中的数据处理 .....      | 16 |
| 1.2.1 电控相位阵列天线 .....       | 17 |
| 1.2.2 相控阵天线在雷达系统中的应用 ..... | 21 |
| 1.2.3 控制器 .....            | 22 |
| 1.2.4 跟踪功能 .....           | 25 |
| 1.3 雷达网中的数据处理 .....        | 28 |
| 1.3.1 雷达网系统举例 .....        | 30 |
| 1.3.2 数据处理的不同类型 .....      | 31 |
| 1.3.3 双基地雷达和双基地雷达网系统 ..... | 33 |
| 1.4 跟踪滤波器 .....            | 37 |
| 1.4.1 现代系统理论概述 .....       | 38 |
| 1.4.2 随机滤波理论 .....         | 39 |
| 1.4.3 理论的应用 .....          | 45 |
| 1.5 雷达数据处理系统的应用 .....      | 47 |
| 1.5.1 雷达数据处理系统的应用举例 .....  | 49 |
| 1.6 小结和结论 .....            | 52 |
| 1.7 参考文献 .....             | 52 |
| 第二章 基本数学方法复习 .....         | 55 |
| 2.1 估计理论介绍 .....           | 55 |
| 2.1.1 历史的述评 .....          | 55 |
| 2.1.2 基本定义 .....           | 56 |
| 2.1.3 估计问题的分类 .....        | 57 |
| 2.1.4 最小平方估计 .....         | 58 |
| 2.1.5 均方误差估计 .....         | 60 |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 2.1.6 | 最大似然估计 .....                | 61  |
| 2.1.7 | 最大后验概率 (贝叶斯) 估计 .....       | 62  |
| 2.2   | 参量问题均方估计的详细说明 .....         | 64  |
| 2.2.1 | 均方估计问题的一般解 .....            | 64  |
| 2.2.2 | 线性均方估计 .....                | 65  |
| 2.3   | 动态问题的均方估计 .....             | 69  |
| 2.3.1 | 系统模型 .....                  | 69  |
| 2.3.2 | 滤波、预测和平滑 .....              | 72  |
| 2.3.3 | 均方估计线性预测和滤波 .....           | 73  |
| 2.4   | 卡尔曼滤波 .....                 | 74  |
| 2.4.1 | 离散时间卡尔曼滤波器和预测器 .....        | 74  |
| 2.4.2 | 数值计算举例 .....                | 81  |
| 2.4.3 | 卡尔曼滤波器的稳态解 .....            | 83  |
| 2.5   | 自适应滤波器 .....                | 85  |
| 2.5.1 | 引言 .....                    | 85  |
| 2.5.2 | 卡尔曼滤波器的灵敏度和误差发散 .....       | 88  |
| 2.5.3 | 贝叶斯自适应滤波方法 .....            | 90  |
| 2.5.4 | 准最佳非贝叶斯自适应滤波器 .....         | 95  |
| 2.6   | 非线性滤波 .....                 | 98  |
| 2.6.1 | 引言 .....                    | 99  |
| 2.6.2 | 推广卡尔曼滤波 .....               | 101 |
| 2.6.3 | 其他准最佳滤波方法 .....             | 103 |
| 2.7   | 小结和结论 .....                 | 112 |
| 2.8   | 参考文献 .....                  | 115 |
| 第三章   | 边扫描边跟踪系统 .....              | 119 |
| 3.1   | 引言 .....                    | 119 |
| 3.2   | 边扫描边跟踪系统概述 .....            | 121 |
| 3.2.1 | 系统的构成 .....                 | 122 |
| 3.2.2 | 杂波图的形成和更新 .....             | 126 |
| 3.3   | 传感器和目标航迹的数学模型 .....         | 130 |
| 3.3.1 | 参考坐标系 .....                 | 130 |
| 3.3.2 | 雷达观测 .....                  | 137 |
| 3.3.3 | 目标模型 .....                  | 145 |
| 3.4   | 跟踪滤波器 .....                 | 148 |
| 3.4.1 | 卡尔曼算法的应用 .....              | 149 |
| 3.4.2 | $\alpha$ - $\beta$ 算法 ..... | 156 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 3.4.3 二维目标航迹的扩展           | 168 |
| 3.4.4 机动目标的自适应方法          | 171 |
| 3.5 点迹-航迹配对逻辑             | 172 |
| 3.5.1 相关和赋值算法             | 174 |
| 3.5.2 相关波门的形状和尺寸          | 177 |
| 3.6 航迹起始方法                | 182 |
| 3.6.1 航迹起始的性质             | 182 |
| 3.6.2 滑窗法                 | 183 |
| 3.6.3 应用举例                | 188 |
| 3.6.4 起始波门的形状和尺寸          | 189 |
| 3.7 小结和结论                 | 191 |
| 3.8 参考文献                  | 191 |
| 第四章 跟踪算法                  | 197 |
| 4.1 引言                    | 197 |
| 4.2 基本跟踪滤波器复习             | 198 |
| 4.2.1 辛格法                 | 198 |
| 4.2.2 半马尔科夫法              | 208 |
| 4.2.3 对雷达观测值的非线性滤波        | 215 |
| 4.3 对机动目标的自适应滤波           | 217 |
| 4.3.1 机动检测算法              | 219 |
| 4.3.2 实现自适应的各种方法          | 223 |
| 4.4 杂波环境中的滤波              | 227 |
| 4.4.1 最佳贝叶斯法              | 229 |
| 4.4.2 准最佳法                | 231 |
| 4.4.3 信号处理器和数据处理器的联合最佳化问题 | 234 |
| 4.5 多目标环境中的滤波             | 236 |
| 4.5.1 两条航迹的交叉             | 237 |
| 4.5.2 最佳和准最佳跟踪滤波器         | 242 |
| 4.5.3 目标编队的跟踪             | 245 |
| 4.6 径向速度观测值的应用            | 246 |
| 4.6.1 清洁环境中的单个目标          | 247 |
| 4.6.2 杂波环境中的单个目标          | 254 |
| 4.6.3 两条航迹的交叉             | 259 |
| 4.6.4 径向速度的线性处理           | 260 |
| 4.7 用相控阵雷达进行有源跟踪          | 262 |
| 4.7.1 雷达数据率的自适应控制         | 262 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 4.7.2 多目标交错跟踪.....        | 264 |
| 4.8 双基地跟踪系统 .....         | 269 |
| 4.8.1 跟踪滤波器的设计.....       | 269 |
| 4.8.2 单基地和双基地雷达系统的比较..... | 272 |
| 4.9 小结和结论 .....           | 275 |
| 4.10 参考文献 .....           | 277 |

# 第一章 绪 论

## 1.1 雷达系统中的数据处理

为介绍雷达数据处理的初步概念，我们先按雷达系统所执行的功能对其进行分类，然后在 1.1.2 节中综述所采用的技术，最后在 1.1.3 节中介绍机械扫描雷达的跟踪概念。

### 1.1.1 雷达的分类

二次世界大战以前的几年中，雷达曾被设想为一种非常简单的探测飞机的设备；而今天，它业已成为由计算机控制的信息系统的一个重要组成部分。这种信息系统具有可编程和自适应能力来感知周围环境，作出战斗决策并进行系统的自我校验。由于军用和民用雷达所要求的性能及灵活性的改善，这一进展已经实现<sup>〔1〕、〔21〕</sup>。

军事应用对雷达有许多要求。过去，每个要求都要由单个雷达系统完成。例如，防空和火控系统要求搜索很大的空域，发现并跟踪从超低空到超高空的低速和高速目标，为导弹和火炮摧毁空中、地面和水面目标提供火力控制，同时还要提供导航辅助手段和侦察工具。现代民用航空的要求则包含有空中交通管制、防撞、仪器着陆系统、气象预报和导航辅助等。在这些应用中，雷达的工作环境往往充满着各种各样的干扰，如杂波、其他射频设备的干扰和人为干扰。

按雷达的主要功能对现代雷达系统进行分类，而不考虑其复杂程度，这样做是有益的。据此，雷达系统可分为四种<sup>〔1〕、〔8〕、〔21〕</sup>。

a) 对空监视雷达 对空监视雷达旨在搜索给定空域内的目

标（如飞机或船舰）。根据雷达的使命和用户的要求，雷达设备可以安装于地面，也可以安装在船上或飞机中。为了在给定的空域中，在由某一特定监视任务所允许的指定时间内提供可靠的探测，整个搜索空域内要有足够的平均功率。

对空监视雷达尚需解决的另外一些问题是要测定下述目标特性：

- 相对于雷达的距离；
- 相对于参考坐标系统的方位；
- 仰角（含目标高度）；
- 目标的径向速度；
- 目标的性质（形状、尺寸和类型）。

发射脉冲和接收回波信号之间的时间延迟用来测量目标的距离，而雷达定向天线的指向则用来确定目标的方向。例如，一个具有水平面内窄波束的天线（在垂直面内为扇形波束），其指向便可测量出目标的方位（见图 1.1）；笔形波束天线则可提供对方位和仰角两个角坐标的测量。

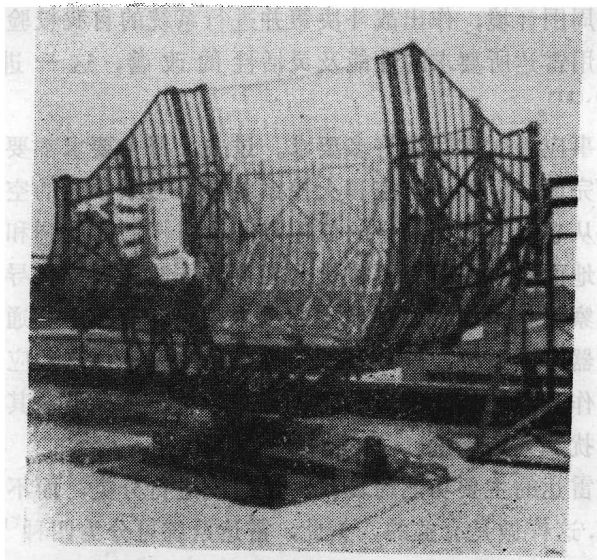


图1.1 具有水平窄波束的S波段机械扫描天线

其次，运动目标回波由于多普勒效应会产生频移。这种频移乃是径向速度的量度，据此可测量出目标的径向速度。最后，根据目标尺寸（决定于回波强度）、形状以及其他一些电磁特性（如对不同极化波的敏感程度）可以对目标进行识别。图 1.2 示出了由对空监视雷达对目标进行一次观测所得到的某些数据。

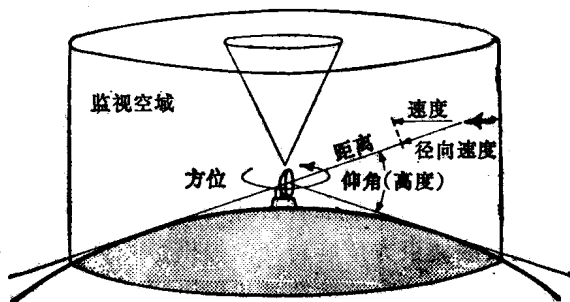


图1.2 对空监视雷达测量的目标参数

备有一个反射器天线，在方位上作机械扫描的雷达是不能测出目标仰角的。仰角坐标可以由另外一部测高雷达来测量。测高雷达观测对空监视雷达业已发现的目标，利用天线“点头”测高方式获取目标仰角数据。但是，现代对空监视雷达已具备自动测高能力。在这种情况下，目标仰角或者由多个堆积波束获得，或者用仰角上的笔形波束进行电扫描获得（见第 1.2 节）。搜索雷达将其控制空域分成许多“分辨单元”，而分辨单元的尺寸由脉冲宽度和天线波束宽度决定。分辨单元中心的坐标即被认作是被检测目标的坐标。

b) 跟踪雷达 跟踪雷达能以比搜索雷达分辨单元尺寸更好的估值精度来估值目标参数。当分辨单元尺寸较大时，目标在分辨单元中的位置尤其重要。这一点对目标未来位置的预测、火力控制、制导和导航等许多方面都是很有用的。目标参数的精确估值可以利用对单一回波信号的适当处理来得到，其精度可通过多脉冲积累而改善。在单脉冲情况下，较好的角度信息是靠同时产

生两个相邻的天线波束来获得的。这两个波束以两种不同的方式组合起来，从而提供了所谓“和波束”( $\Sigma$ )和“差波束”( $\Delta$ )。角度信息则决定于对 $\Delta/\Sigma$ 的处理。

精确测定距离和多普勒频移的方法与角度估计方法十分相似。距离估计是把信号相对于总脉冲能量归一（相应于和波束 $\Sigma$ ）并以“先-后”波门的形式进行差分处理（相应于差波束 $\Delta$ ）。至于多普勒信息更是与角度估计相似，因为多普勒频率通道是类似于相邻的角度波束通道的。

在多个脉冲积累的情况下，必须区分是连续跟踪雷达还是边扫描边跟踪雷达。前者对某个具体目标提供连续的跟踪数据，其天线波束在任何瞬间都是瞄准着目标的。相比之下，边扫描边跟踪雷达却可在天线波束方位旋转期间提供多个目标的周期取样数据。总的说来，这两种跟踪系统是采用了不同类型的设备。连续跟踪理论在参考文献〔1〕中已有透彻阐述，本书将不再涉及。而关于边扫描边跟踪雷达的概念，我们将在1.1.3节中引出并在第三章中详细予以说明。

c) **电扫描阵列雷达** 电扫描阵列雷达可以按搜索雷达和跟踪雷达方式完成搜索和跟踪两种功能，而且分别完成这两种功能时都可以做到最佳。它可以在几乎每一瞬间，在其控制空域的任一方向上形成一个或多个波束对准目标。这一功能使它能够同时完成搜索、多目标跟踪、数据传输、导弹制导和其他功能，因而我们称它为多功能雷达系统。

电扫描阵列雷达，用一个叫做雷达控制器的计算机，根据环境、雷达的任务和操纵员的要求自适应地管理着波束控制、驻留时间和雷达功率。这将在1.2节中讲述。

d) **二次监视雷达** 二次监视雷达用询问-回答的方式进行目标的搜索和识别，这意味着必须要有协作目标配合。二次监视雷达包含一个地面询问机/接收机，一个天线，一个机上应答器和一个雷达荧光屏显示器。雷达询问是发射一编码脉冲波形去触发应答器，应答器则自动提供出目标属性和高度。而距离和方位的测



量由地面接收机进行，它像普通搜索雷达一样来处理回答信号。在民用和军事两个领域，二次监视雷达的应用越来越普遍。这一技术将在第二卷的 7.1 节中详述。

### 1.1.2 雷达技术概述

可靠而便宜的数字式微电子电路的出现，使人们有可能实现更为完善的数据录取算法和处理、控制手段，从而满足现代雷达的工作要求<sup>[11]</sup>。

图 1.3 示出了一种现代雷达系统的简化框图，其布局取决于应用方式<sup>[8,12]</sup>。在某些情况下，雷达被安装在两个舱房中：第一个舱房包括发射机、接收机和数字信号处理设备；第二个舱房装有计算机（执行数据处理）、显示器和控制器。图 1.4 是第一舱房布局的一个例子。图 1.5 中画出了空中交通管制中的控制台。至于数据处理计算机，在尺寸有所限制的场合（如要地防御雷达）可以是小型机，而在需要多种功能、处理多个目标的场合，例如在空中交通管制中，可以是大型中心计算机甚至是由多个小型机组成的网络。

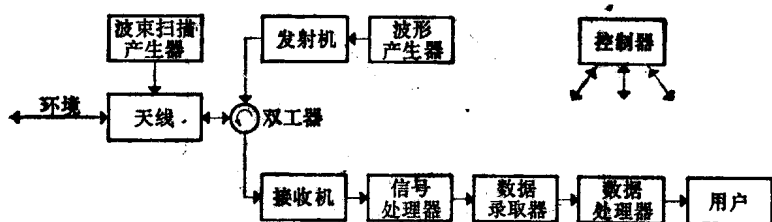


图 1.3 现代单基地雷达系统的简化框图

现将图 1.3 中的主要方块及其相应功能简述如下：

#### 天线和波束扫描产生器

天线和波束扫描产生器决定了发射波束、接收波束的形状和指向。天线可以是一个在方位上机械旋转的反射器，再配上另一个在仰角上作机械俯仰的天线（测高雷达）；也可以是一个复杂的相控阵天线，其波束可以在方位和/或仰角上电子扫描。相控阵