雷达数据数字处理

孙仲康 编著

国防工业出版社

雷达数据数字处理

孙仲康 编著

国防工业出版社

内容简介

本书是作者多次在各地讲学的讲稿，经进一步整理加工而写成的。针对雷达的测量和跟踪，介绍了估值理论在雷达数据处理中的应用。主要内容有：有限记忆处理，$\alpha-\beta$ 常增益滤波处理，不变量嵌入方法的应用，卡尔曼滤波方法及其在战术雷达中的应用，数据处理与跟踪伺服系统的结合。还介绍了多站间的数据交接和边扫边跟系统中的目标关联问题。为了阅读方便，还纳入了一章介绍有关预备知识的内容。

本书可作为雷达、导航、无线电制导、测量控制、信息数据处理等专业的大专院校的高年级学生选修及研究生学习之用，可供上述各专业技术领域内从事数据处理的工程技术人员、科研人员在工作学习中作参考之用。

雷达数据数字处理

孙仲康　编著

*

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

*

$850\times1168^1/_{32}$　印张 $12^1/_8$　310千字

1983年6月第一版　1983年6月第一次印刷　印数：0,001—3,800册

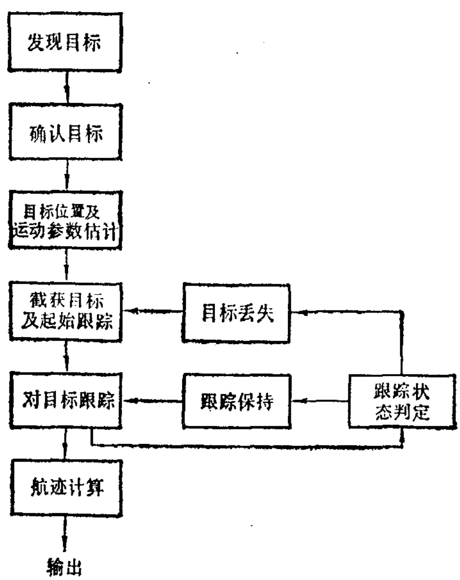
统一书号：15034·2470　　定价：1.50元

目 录

引　言

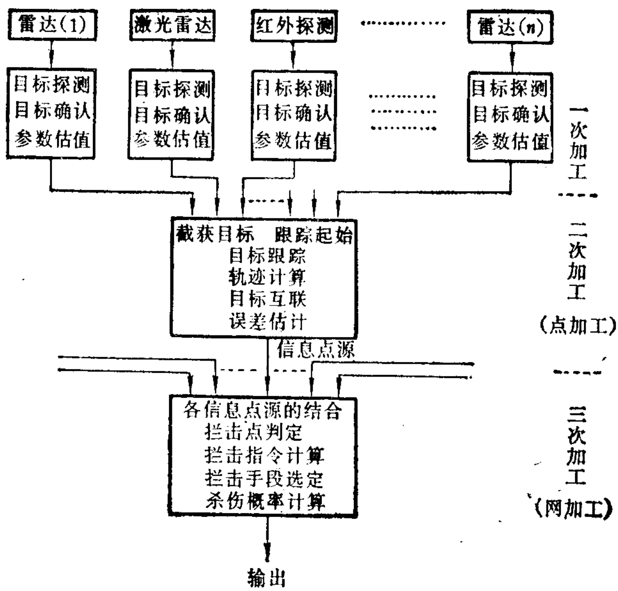
数字计算技术在雷达中的应用，促进了雷达技术的发展。国内外对雷达数字化的工作都十分重视，并积极组织推广交流、研究发展。雷达数字化涉及的方面很多，例如雷达信号的处理、雷达信息的检测和估值、雷达数据的处理、雷达显示、监测及模拟、雷达功能的自适应控制、雷达的抗干扰及目标识别等。本书介绍的主要内容是有关雷达数据的数字处理。

雷达是利用电磁波的辐射和接收的方法，对目标进行探测和定位的。对运动的目标需要不间断地对之探测和定位，一般的警戒雷达要求定位的精度不是太高，而对火力控制或精密测轨用的跟踪雷达来说，就要求雷达既能可靠地探测和跟踪目标，并能精确地给以定位。要达到这些指标，就牵涉到整个雷达的性能和雷达工作过程的各个方面。雷达的工作流程如图I所示，其中发现目标、确认目标的过程主要是通过对雷达回波信号的处理、检测、分辨、识别来



图I　雷达的工作流程图

完成的。目标位置及运动参数的估计主要是通过对目标参数的测量及统计估计来完成的。而对目标的截获、起始跟踪、跟踪、航迹计算、跟踪状态判定等则通过雷达数据处理的方法来实现。对空情报网中雷达或其它类型的目标感受器送出的信息，其处理过程大致可以分成三个阶段，有的资料上称之为一次加工、二次加工及三次加工，如图Ⅰ所示。



图Ⅰ 处理过程图

图中反映出一个对空情报网的情报信息来自各个对空情报站，每个情报站可以由多部雷达、激光、红外或其它感受器所组成。同一情报站处的感受器分别进行目标探测、目标确认及参数估值，送出被跟踪目标的位置及运动参数，这被称之为一次加工。情报站对一个或多个感受器送出的目标数据进行截获目标、起始跟踪、目标跟踪、轨迹计算、目标互联、误差估计等操作，被称

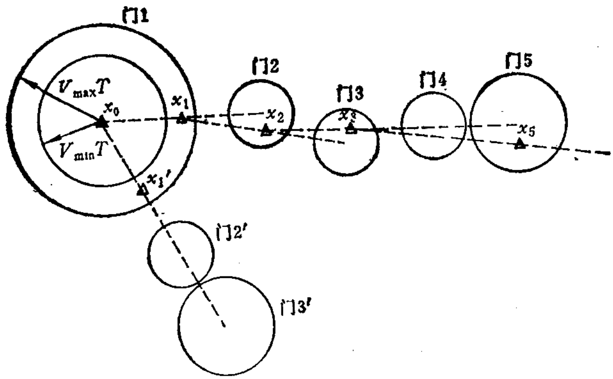
之为二次加工或站加工。加工后的数据传送到情报网中心，该中心把各站送来的数据综合处理，可以作出拦击点的判定、拦击指令的计算、拦击手段的选定、杀伤概率的计算等，这被称之为三次加工。一部现代化的跟踪多目标的相控阵雷达，本身就可能具备这样三个阶段的处理过程，因此这里把数字式的一次加工称之为信号数字处理，二次加工称之为数据数字处理。

数据处理的含义非常广泛，这里指的雷达数据数字处理，就是对用雷达方法取得的目标位置及运动参数（如径向距离 r、径向速度 $\dot{r}$、方位角 β、俯仰角 ε 等数据）进行数据处理。由于雷达测量取得的数据必然含有测量误差或噪声，因此要通过处理来尽可能准确地得到目标的各项参数。基本的处理操作为平滑滤波、预测外推、内插、求导等。利用这些操作可以实现对目标的实时跟踪、航迹或轨道的精确估计、航迹或弹着点的预测，以及有些运动参数（如速度、加速度）的估计。

有些跟踪雷达的体制能够逐次测量得出目标的位置数据。例如、边扫瞄边跟踪雷达具有等速旋转的天线，它使用统计估角的方法测出目标的角位置来。天线每旋转 360° 一周，就对空域扫瞄一次，对目标也进行一次角位置的估计，因此雷达可以等周期地提供出目标的角位置数据。在使用相控阵天线的雷达中，在一个重复周期 T 内可以向 N 个不同的方向发射 N 个信号，并在同一个重复周期内由 N 个不同的方向先后接收 N 个相应的目标回波信号来。根据天线接收波束的空间阶跃位置及对应的单脉冲误差信号，就可以合成目标的空间角位置数据，因此它可以每重复周期提供出一次目标的位置数据。具有这类跟踪体制的雷达，实际上是在对运动目标进行逐次测量，等周期地（也可以不等周期地）提供出一串目标空间位置矢量数据的序列（r_k，β_k，ε_k，$k=0$，1，2，…）。对这串数据列进行平滑滤波、预测、外推、求导等处理操作，就可得到精确的目标位置、位置预测值、速度等数据。

现举例叙述一下雷达从探测目标到跟踪目标的一部份过程，

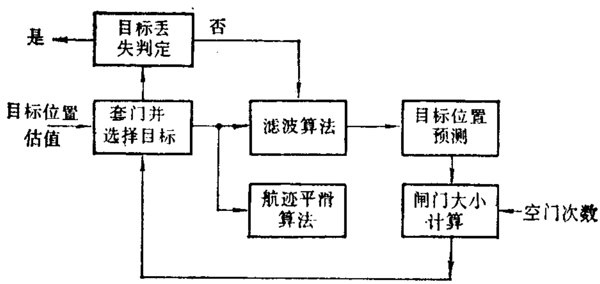
见图Ⅱ。在 $0 \to T$ 时间范围内，发现有目标 x_0，作出门 1，即大圆（半径为 $V_{max}T$）与小圆（半径为 $V_{min}T$）之间的区域，这里的 V_{max} 及 V_{min} 是目标可能的最大和最小速度。在下一个重复周期时间范围内（即 $T \to 2T$），门 1 内不同方位上出现有回波 x_1 及



图Ⅱ　探测-跟踪的过程图

x_1'，根据 x_1 及 x_1' 与 x_0 的相对位置可以预测下一个重复周期内目标可能出现的位置（这里假设目标是等速运动的），并在各对应位置上设置门 2 及门 2′。在 $2T \to 3T$ 时间范围内，门 2 内发现有 x_2，再根据 x_1、x_2 的相对位置预测下一点的位置作门 3；在这段时间范围内门 2′ 内没有出现回波，出现空门现象，这可能是由于 x_1' 不是目标回波而由虚警所引起，也可能是由于目标回波起伏而引起的；为了慎重起见，再次预测下一点作出门 3′，这个门的直径可以作得大一些以便抓住目标。在 $3T \to 4T$ 之间，门 3 内发现有回波 x_3，依前述方法又可预测下一点作出门 4；而门 3′ 内仍然没有发现有回波，这时就可认为 x_1' 是虚假的，而予以放弃观测。在 $4T \to 5T$ 之间，门 4 内没有发现有回波。继续预测一点作门 5，这个门也作得大一点。在 $5T \to 6T$ 之间发现有回波 x_5，再依前述方法作出下一个门等待下一次抓住目标回波。从上面的叙述可以看出这个过程是发现目标→作出闸门→依准则判定是否是应跟踪

的目标→进行跟踪提供滤波后的目标位置数据→预测下一次目标位置→作出闸门，然后再依序循环。图Ⅳ示出了对目标进行跟踪的流程图。套门就是计算目标位置估值与预测位置之差，并判定它是否位于闸门之内。闸门的大小根据空门的次数来设定，空门次数多，闸门就要大。判定目标是否丢失就是“丢失检测”，它是一个统计判决问题，例如连续 k 次出现空门就算丢失等等。航迹平滑的目的是为了提供更精确的目标位置数据。滤波及预测可以用来计算设置闸门的位置。



图Ⅳ　对目标跟踪的流程图

图Ⅳ中套门（并选择目标）是在多目标情况下使用的。若套门过程中，门内出现有多个回波，那末要跟踪的目标到底是哪一个呢？这就要求对目标进行选择，使上一个被跟踪的目标与这次门中出现的目标回波互相联系起来。这个问题就是目标“互联”问题或称“关联”问题。由此可见数字数据处理可以直接应用到雷达对目标的跟踪中去。

数字数据处理与跟踪伺服系统结合起来，可以大大提高跟踪的质量。

本书内容共有八章，为了便于阅读编入了一些有关的预备知识。本书还涉及到利用信号数字处理、自动控制等方面的知识，

这些被认为读者已有所掌握。由于工作及时间关系，有关自适应跟踪算法，对战略目标的跟踪算法，目标的探测、估值、互联及跟踪的结合问题等等尚未涉及，只好留待以后再去完成。

第一章 预备知识

为了讨论以后各章的内容，这一章预先介绍或复习一下有关矩阵、状态变量分析方法、概率与随机过程等方面的内容。

§1 矩阵运算概要

（1）矩阵的定义

矩阵 是一种由 m 行 n 列共 $m\ n$ 个元素组成的 $m\times n$ 阶矩形阵列，其形式如下表示

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13}\cdots a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23}\cdots a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \quad\ \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3}\cdots a_{mn} \end{bmatrix} \tag{1-1}$$

式中矩阵 A 中的元素 a_{ij}，可以是实数、复数、算子或某些变量的函数。元素 a_{ij} 的下标 i、j 表示该元素位于第 i 行第 j 列。

方阵 当 $n=m$，即行数与列数相等时，这种矩阵称之为 n 阶方阵。方阵中的 a_{11}、a_{22}、a_{33}、a_{44}、…、a_{nn} 被称之为方阵的主对角线。

列矩阵、行矩阵 n 行 1 列的 $n\times 1$ 阶矩阵称之为列矩阵或列矢量，如下式 $\boldsymbol{x}$。1 行 n 列的 $1\times n$ 阶矩阵称之为行矩阵或行矢量，如下式 $\boldsymbol{y}$。

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix};\qquad \boldsymbol{y}=[y_1\quad y_2\quad y_3] \tag{1-2}$$

对角矩阵 方阵中除主对角线各元素以外（它们可以为零，也可以不为零），其它各元素都为零时，这种矩阵称之为对角矩阵，如下式所示 3×3 对角矩阵

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}; \quad a_{ij}=0，当 i \neq j 时。\tag{1-3}$$

单位矩阵 一个对角矩阵中，对角线上各元素都为1，被称之为单位矩阵 I。

$$I=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

这个矩阵有时记作为

$$I=[\delta_{ij}]，而\ \delta_{ij}=\begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i=j \end{cases}\tag{1-4}$$

零矩阵 所有元素都为零的矩阵称之为零矩阵。

转置矩阵 若将矩阵 A 的行与列互相对换，所得的矩阵称之为转置矩阵，用 A^T 或 A' 表示转置矩阵。例如 2×3 阶的矩阵 A，其转置为 A' 如下，

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix}; \quad A'=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \\ a_{13} & a_{23} \end{bmatrix}\tag{1-5}$$

可以明显地看出，转置矩阵的转置等于原来的矩阵，即

$$(A')'=A\tag{1-6}$$

一个 $n\times1$ 阶列矩阵表示的矢量 $\boldsymbol{x}$，它的转置可以用 $1\times n$ 的行矩阵来表示，即

$$\boldsymbol{x}'=[x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]\tag{1-7}$$

对称矩阵 一个方阵，它的各个元素 a_{ij} 以它的主对角线为准作对称分布，即 $a_{ij}=a_{ji}$，则被称之为对称矩阵，如下式所示的 3×3 对称方阵。

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{bmatrix}\tag{1-8}$$

从上式可以看出，对称矩阵的转置等于对称矩阵本身，即$A'=A$。

（2）矩阵的相等、相加和相减

矩阵不是一个数、量或函数，它是各个量的一个矩形阵列。因此需要定义它的相等、相加、相减等运算。

相等 两矩阵相等是指两矩阵具有同样的阶数，而且对应各行各列的元素分别相等，即 $A=B$ 是指 $a_{ij}=b_{ij}$ 恒成立。

相加相减 假如 A 及 B 是两个阶数相同，即行数和列数都相同的矩阵，那末矩阵相加及相减 $A\pm B$ 定义为一个同阶数的矩阵 C，它的元素 c_{ij} 是 a_{ij} 及 b_{ij} 之和或差，并记作为

$$C=A\pm B \tag{1-9}$$

其中 $c_{ij}=a_{ij}\pm b_{ij}$ 对所有的 i，j

根据上述定义可知，矩阵的加法服从交换律、结合律，即

$$A+B=B+A \tag{1-10}$$

$$A+(B+C)=(A+B)+C \tag{1-11}$$

又两个同阶矩阵和的转置为

$$(A+B)'=A'+B' \tag{1-12}$$

（3）矩阵的乘法

与常数相乘 一个矩阵 A 与一个普通数或一个标量 k 相乘，是指 A 中的每个元素 a_{ij} 都与 k 相乘，如下式所示

$$B=kA \tag{1-13}$$

式中 $b_{ij}=ka_{ij}$，对所有的 i，j。

矩阵相乘 定义如下：若矩阵 A 是 $n\times r$ 阶矩阵，B 是 $r\times m$ 阶矩阵，则 A 和 B 相乘得 C 记成为

$$C=AB$$

而 C 是 $n\times m$ 阶矩阵，其对应的各个元素为

$$C=[c_{ij}]=\left[\sum_{k=1}^{r} a_{ik}b_{kj}\right] \tag{1-14}$$

其中 $i=1,2,\cdots,n$；$j=1,2,\cdots,m$。

矩阵C的阶数可用下式表示

$$(n\times r)(r\times m)=(n\times m) \tag{1-15}$$

这个表达式说明前一个矩阵的列数应该等于后一个矩阵的行数，并且只有在这个条件下才能相乘，例如

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \qquad B=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix}$$

则根据公式（1-14)(1-15）可知$C=AB$的阶数为：

$$(3\times 3)(3\times 2)=(3\times 2) \tag{1-16}$$

即C矩阵有3行2列，又根据（1-14）式可得出如下各个元素c_{ij}组成的C矩阵。

$$C=\begin{bmatrix} (a_{11}b_{11}+a_{12}b_{21}+a_{13}b_{31}) & (a_{11}b_{12}+a_{12}b_{22}+a_{13}b_{32}) \\ (a_{21}b_{11}+a_{22}b_{21}+a_{23}b_{31}) & (a_{21}b_{12}+a_{22}b_{22}+a_{23}b_{32}) \\ (a_{31}b_{11}+a_{32}b_{21}+a_{33}b_{31}) & (a_{31}b_{12}+a_{32}b_{22}+a_{33}b_{32}) \end{bmatrix} \tag{1-17}$$

乘法规则　矩阵相乘服从结合律、分配律，但一般情况下不服从交换律，这就是说

$$A(BC)=(AB)C \quad \text{服从结合律} \tag{1-18}$$

$$(A+B)C=AC+BC \quad \text{服从分配律} \tag{1-19}$$

以及一般来说　$AB\neq BA$　不服从交换律　(1-20)

但特殊情况例外。现举例说明。

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}, \qquad B=\begin{bmatrix} 2 & 1 & 5 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

阶数：3×2　　　阶数：2×3

则得

$$AB=\begin{bmatrix} 2 & 1 & 5 \\ 5 & 2 & 10 \\ 10 & 3 & 15 \end{bmatrix}, \qquad BA=\begin{bmatrix} 19 & 21 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

阶数：$(3\times 2)(2\times 3)=(3\times 3)$　阶数：$(2\times 3)(3\times 2)=(2\times 2)$

由此可见，$AB \neq BA$，而矩阵乘法一般不服从交换律，所以 AB 应称之为 A 左乘 B 或 B 右乘 A，又称之为 A 前乘 B 或 B 后乘 A。

假如有两个矩阵相乘满足交换律，即

$$AB = BA$$

这时称矩阵 A 及 B 是可交换的，例如单位矩阵与同阶的方阵相乘，满足可交换的条件即

$$AI = IA \tag{1-21}$$

举例说明，当

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则

$$AI = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$IA = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

故（1-21）式成立。

矩阵与矢量相乘 若 A 是 $m \times n$ 矩阵，$\boldsymbol{x}$ 为 $n \times 1$ 的矢量，则其乘积 $A\boldsymbol{x}$ 可记作为一个列矩阵或矢量 $\boldsymbol{z}$，即

$$\boldsymbol{z} = A\boldsymbol{x} = [z_i] \tag{1-22}$$

式中 $z_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j \qquad i = 1, 2, \cdots m,$

矢量 $\boldsymbol{z}$ 是一个 $m \times 1$ 的列矩阵，它是由于矢量 $\boldsymbol{x}$ 被施加了 A 的**线性变换**后得出来的。

矢量的内积 若两个二维矢量 $\boldsymbol{x}$ 及 $\boldsymbol{y}$ 分别为

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

则定义其内积为