

军队“2110工程”资助出版

目标跟踪与数据融合 理论及方法

M
ethod and Theory
of Target Tracking and Data Fusion

石章松 刘忠 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

军队“2110 工程”资助出版

目标跟踪与数据融合 理论及方法

Method and Theory of Target Tracking and Data Fusion

石章松 刘忠 王航宇 孙世岩 周丰 林华 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍了目标定位与跟踪的目的、意义、基本概念和基本原理;目标定位的概念、方法和定位误差的度量;目标跟踪的基本方法;机动目标跟踪典型算法;基于纯方位的单站目标跟踪问题;水下目标被动跟踪算法以及平台的航路机动优化方法;目标跟踪中的多传感器数据融合;目标跟踪算法的仿真与验证问题等。

本书适合相关领域的研究人员和工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

目标跟踪与数据融合理论及方法/石章松等编著. —北京:国防工业出版社,2010.7
ISBN 978-7-118-06991-4

I. ①目... II. ①石... III. ①军用船—指挥控制系统 IV. ①U674.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 143948 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 21¼ 字数 394 千字

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 49.00 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

前 言

目标定位与跟踪是依据最佳估计原理,采用数字滤波的计算方法,对传感器接收到的量测进行处理,估计目标运动要素的数据处理过程。本书是作者在密切跟踪该领域技术研究成果的基础上总结而成,较为全面、系统地介绍了目标跟踪及数据融合理论与最新研究成果,以期为读者进一步学习、研究和应用打下基础。

全书共分7章,第1章绪论,介绍了目标定位与跟踪的目的、意义、基本概念和基本原理,以便读者对全书概貌有所了解。第2章介绍目标定位的概念、方法和定位误差的度量。第3章介绍了目标跟踪的基本方法,以卡尔曼滤波为主线,介绍了目标跟踪算法实现的基本原理和步骤。第4章介绍了机动目标跟踪典型算法,从模型的不确定性出发,根据自适应滤波思想,介绍了机动检测自适应、参数辨识自适应和“全面”自适应机动目标跟踪算法。第5章介绍了基于纯方位的单站目标跟踪问题。在分析单站纯方位定位可观测性的基础上,介绍水下目标被动跟踪算法以及平台的航路机动优化方法。第6章是介绍目标跟踪中的多传感器数据融合,围绕目标跟踪中的多传感器数据融合理论及其应用,介绍了多传感器数据融合的基本概念、功能模型和结构模型,实现多传感器多目标跟踪。第7章是目标跟踪算法的仿真与验证问题,描述了采用解析法和蒙特卡洛仿真方式检验跟踪算法的相关模型和实现过程。

本书主要根据作战参加的相关研究项目和多年研究成果,经过进一步的组织和加工而完成的。同时,也参考了国内外许多专家学者的文章和专著,在此谨向他们一并致谢。

本书在编写过程中得到舰艇指控系统教研室全体同仁们的诸多帮助和支持,特别指出的是博士生张丕旭、王成飞、李锐、肖胜等参与了部分章节的编写和校对工作,在此一并表示衷心感谢。

由于编写者水平有限,难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

作者

2010年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 基本原理	2
1.3 内容组织	5
第2章 目标定位	7
2.1 概述	7
2.2 坐标系及坐标转换	8
2.2.1 地球椭球知识	8
2.2.2 常用坐标系	9
2.2.3 坐标转换关系及计算	12
2.3 定位误差的度量	31
2.3.1 三维正态分布	32
2.3.2 等概率密度椭球(误差椭球)	32
2.3.3 落入误差球的概率	33
2.3.4 球概率误差及圆概率误差	34
2.4 空间定位方法及误差分析	35
2.4.1 单站球坐标测量定位系统	35
2.4.2 多站斜距离测量定位系统	40
2.4.3 动目标定位的平滑	47
第3章 目标跟踪基本方法	48
3.1 概述	48
3.2 坐标系的选择	50
3.2.1 极坐标系	50
3.2.2 直角坐标系	51
3.3 数据预处理	54
3.3.1 野点剔除	54
3.3.2 数据压缩技术	56

3.4	目标运动模型	58
3.4.1	微分多项式模型	59
3.4.2	CV 和 CA 模型	60
3.4.3	辛格模型	62
3.4.4	半马尔科夫模型	64
3.4.5	机动目标“当前”模型	65
3.4.6	二维转弯运动模型	65
3.4.7	三维模型	68
3.4.8	比例导引运动模型	70
3.5	量测模型	73
3.5.1	传感器球坐标模型	73
3.5.2	传感器直角坐标模型	74
3.5.3	两种测量坐标转换误差分析	75
3.6	基本的目标跟踪滤波方法	80
3.6.1	基于圆周运动模型的卡尔曼滤波算法	80
3.6.2	基于比例导引运动的卡尔曼滤波算法	86
第4章	机动目标跟踪方法	91
4.1	机动检测自适应滤波	92
4.1.1	机动检测方法	92
4.1.2	实现机动检测自适应滤波的各种方法	94
4.1.3	变维滤波算法	96
4.2	实时辨识自适应滤波	98
4.2.1	噪声统计特性的极大似然估计	99
4.2.2	噪声均值与协方差时变时的自适应滤波算法	104
4.2.3	输入估计法	105
4.3	“全面”自适应滤波	108
4.3.1	MM 算法的一般描述	109
4.3.2	滤波器重新初始化和 IMM 算法	112
4.4	基于弹道特性的高速机动目标跟踪算法	115
4.4.1	高速机动反舰导弹的运动建模	116
4.4.2	基于参数辨识模型的机动目标跟踪算法	128
4.4.3	基于弹道规律的机动目标跟踪算法	138
第5章	基于纯方位的水下目标被动跟踪方法	145
5.1	概述	145

5.1.1	可观测性研究状况	146
5.1.2	定位与跟踪算法的研究状况	148
5.1.3	单站观测器机动航路优化的研究状况	150
5.2	单站纯方位目标运动分析的可观测性分析	151
5.2.1	引言	151
5.2.2	问题描述	152
5.2.3	确定性方位测量的图解分析	155
5.2.4	系统的可观测性	162
5.3	单站纯方位目标定位与跟踪算法	173
5.3.1	系统模型描述	174
5.3.2	基于辅助变量的伪线性递推最小二乘估计算法	175
5.3.3	近似线性化的两阶段滤波算法	181
5.4	纯方位观测器平台机动航路优化	189
5.4.1	定位与跟踪误差的下限	190
5.4.2	航路优化问题的提出	194
5.4.3	观测器航路对定位精度的影响	197
5.4.4	潜艇典型航路的定位精度分析	200
5.4.5	航路优化的方法	210
第 6 章	基于多传感器数据融合的目标跟踪方法	218
6.1	概述	218
6.1.1	数据融合的定义	218
6.1.2	多源数据融合模型	219
6.1.3	数据融合的主要处理内容	223
6.1.4	一个典型的数据关联—状态融合跟踪环	224
6.2	时间与空间配准	229
6.2.1	问题描述	229
6.2.2	时间配准算法	230
6.2.3	空间配准算法	232
6.3	数据关联	246
6.3.1	数据关联举例	246
6.3.2	数据关联过程	249
6.3.3	数据关联的一般步骤	258
6.3.4	典型数据关联方法	260
6.4	航迹及其融合	269

6.4.1	基本概念	269
6.4.2	航迹管理	271
6.4.3	航迹关联	275
6.4.4	航迹融合	288
第7章	目标跟踪算法的仿真与验证	296
7.1	概述	296
7.2	系统分析法	296
7.2.1	多项式分析	296
7.2.2	Riccati 方法	297
7.2.3	Cramer-Rao 下界方法	299
7.3	Monte Carlo 仿真设计	300
7.3.1	Monte Carlo 仿真方法	300
7.3.2	随机数的产生方法	300
7.3.3	仿真设计与结果解释	302
7.3.4	一些常用的统计指标	304
7.4	目标跟踪算法的仿真	305
7.4.1	引言	305
7.4.2	软件结构设计	305
7.4.3	软件子模块设计	308
参考文献		317

第1章 绪论

1.1 引言

众所周知,火控、指控系统是武器系统和作战系统的核心,是武器威力的倍增器,而目标定位与跟踪是火控、指控系统中极为重要的处理模块。

在火控系统中,它的总体任务是根据作战指挥命令,利用可获取的各种战场信息、数据,对目标进行探测、定位与跟踪,解算目标运动要素,实时提供控制武器发射所需参数,控制武器准确地对目标实施有效打击或拦截。因此,为了保证较好地完成火控任务,对目标实施连续定位、跟踪,准确求解目标运动要素是现代火控系统应具备重要功能之一,是解算武器射击控制诸元的基础。理论和实践检验表明,目标跟踪的效果严重影响火控系统的反应时间、射击精度等战技指标,同火控系统的作战效能有密切联系。目标跟踪功能模块已成为现代火控系统功能中的基本功能配置,在海军多种舰艇火控系统中得到体现。

在指控系统中,目标跟踪是其航迹处理的重要内容之一。现代指控系统中的多目标航迹管理中,目标跟踪处理包括航迹起始、航迹维持(航迹关联、滤波、预测、融合)、航迹终结等处理是实现多目标航迹管理的核心内容,处理的结果对指挥员提供清晰、统一的战场态势具有重要意义。

综上所述,目标定位与跟踪是依据最佳估计原理,采用数字滤波的计算方法,对传感器接收到的量测进行处理,估计目标运动要素的数据处理过程。量测是指被噪声污染的有关目标状态的传感器观测信息,包括斜距离、方位角、高低角以及时差、多普勒频率等其他信息。目标运动要素一般指目标状态、航向、舷角等参数。目标状态主要是指目标的运动分量(如位置、速度、加速度等)。通常,也把目标定位与跟踪简称为目标跟踪。

因此,目标跟踪是现代火控、指控系统中不可缺少的处理模块之一,在系统中属于数据处理环节,如图 1.1.1 所示。一个典型的目标跟踪系统由传感器单元、信号处理单元、数据处理单元以及显示、决策和控制单元组成。这里传感器泛指各种探测雷达、光电设备、声纳传感器等探测器材,信号处理单元完成传感器底层信号的处理,数据处理单元根据底层信号处理输出的参数(包括角度、距离、时差等)实现目标状态估计、计算传感器波束控制指令,其中的核心

技术之一就是目标跟踪技术，即依据最佳估计原理，实现对目标跟踪处理的理论和方法。

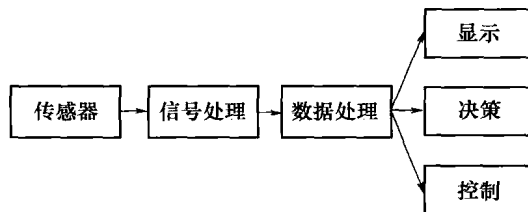


图 1.1.1 典型目标跟踪系统的结构示意图

因此，针对现代指控、火控系统目标跟踪问题，系统地介绍目标跟踪中的基本理论和方法，为学习人员提供全面而系统的参考书，是本书编写的目的。本书以适用于主动雷达的目标跟踪方法为主，但是，对被动雷达探测传感器、光电传感器、水下声纳传感器构成的目标跟踪系统，这些方法和原理，同样适用。

下面介绍目标跟踪的基本原理、研究历史和发展概况以及本书涉及的内容。

1.2 基本原理

根据目标跟踪的定义，目标跟踪的本质是一个混合系统的状态估计问题，即利用传感器的离散量观测来估计目标的连续状态，滤去随机噪声和求解目标运动要素。

目标跟踪系统中，根据传感器和跟踪处理目标的数量关系，目标跟踪问题可分为三类：

(1) 单传感器单目标跟踪(Single Sensor Single Target Tracking, SST)，即单部传感器对一个目标的跟踪处理；

(2) 单传感器多目标跟踪(Single Sensor Multiple Targets Tracking, SMT)，即单部传感器对多个目标的跟踪处理；

(3) 多传感器多目标跟踪(Multiple Sensors Multiple Targets Tracking, MSMTT)，即多部传感器实现多个目标的跟踪处理，就是利用多传感器的联合探测来实现多目标融合跟踪，它是多传感器信息融合中的热点问题。这三类目标跟踪问题中，基础是单传感器单目标跟踪理论和方法。

单目标跟踪涉及到目标坐标系的选择、观测数据预处理、目标运动模型建模、机动检测与机动辨识、滤波与预测等，如图 1.2.1 所示。同单目标跟踪相比，多目标跟踪还需要考虑数据互联、跟踪门规则、跟踪起始和跟踪终止等内容，如图 1.2.2 所示。

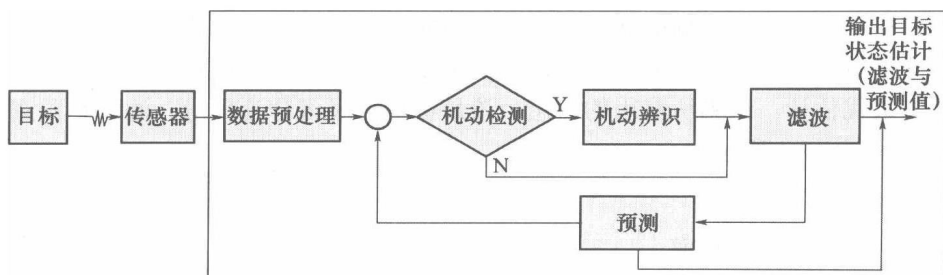


图 1.2.1 单目标跟踪处理示意图

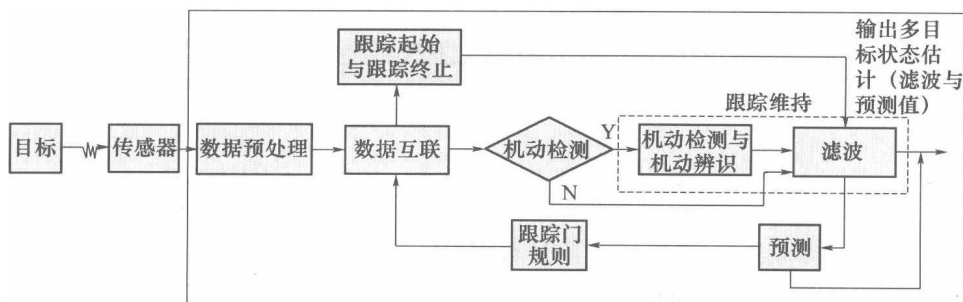


图 1.2.2 多目标跟踪处理示意图

滤波和预测是目标跟踪数据处理中的核心处理环节，主要目的是从观测数据中滤掉随机干扰(噪声)，估计当前和未来时刻目标的运动状态，包括位置、速度和加速度等。例如，把观测到的目标现在坐标中的随机误差消减到某一最低程度，把比较“平滑”的坐标变化情况显示出来，并根据目标坐标的变化规律确定目标运动参数。这是火控系统计算射击诸元求解之前首先需要解决的重要问题。

机器输入的目标现在坐标是由雷达、声纳或光学仪器测得的，测量过程中不可避免地会带来“随机误差”。随机误差的特点是相对实际准确值呈正负快速变化，而且与目标运动引起的坐标变化相比是很快的。图 1.2.3 为坐标 X 分量的情况。对 X 分量微分后，可得 X 分量的速度；对速度微分后可得相应的加速度。在用微分求取目标运动参数时，由于随机误差是快变化信号，其变化率很大。因此，经过微分后会使得求得的目标运动参数带来很大的误差，甚至于可能达到严重歪曲的地步。因此，在求取目标运动参数时要设法“滤”去随机误差。引入滤波计算就是要减小这种随机误差对求取目标运动参数的影响，而保留目标运动引起的真实坐标变化值(称为有用信号)。因此在求取目标运动参数时滤波是必不可少的。

在滤波中, 所依据的观测数据是有限的。根据这些观测数据, 不可能完全消除随机误差, 一般只能依据一定的准则来估计目标的运动状态, 一般称为状态的最优估计。根据所利用的信息, 该最优估计又可分为平滑、滤波和预测估计, 如图 1.2.4 所示。

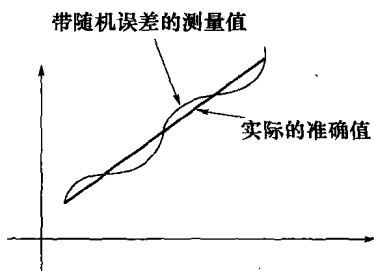


图 1.2.3 X 分量

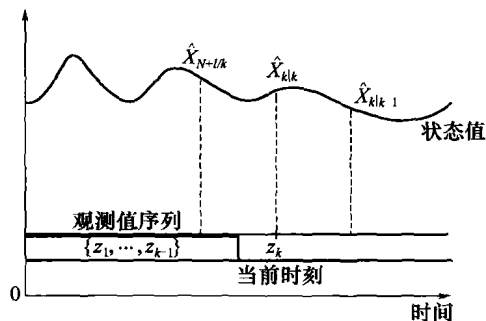


图 1.2.4 平滑、滤波和预测关系示意图

(1) 滤波。根据过去的所有测量数据 $\{Z_1, \dots, Z_{k-1}\}$, 包括当前时刻 k 的测量 Z_k , 估计出当前时刻 k 的状态值 $\hat{X}_{k/k}$ 。

(2) 预测。根据过去的所有测量数据 $\{Z_1, \dots, Z_{k-1}\}$, 包括当前时刻 k 的测量 Z_k , 估计出未来时刻 $k+l (l > 0)$ 的状态值 $\hat{X}_{k+l/k}$ 。

(3) 平滑。根据所有或一段测量数据 $\{Z_{N+1}, \dots, Z_{N+k}\}$, 估计出过去某一时刻 $N+l (l < k)$ 的状态值 $\hat{X}_{N+l/k}$ 。

为了理解滤波计算的原理, 先以算法平均法为例加以说明。图 1.2.5 是 X 分量的一系列带有随机误差的输入量。在观测时间 t_h 内输入 n 个点, 记为 x_1 、 x_2 、 $\dots$ 、 x_n 。采样间隔为 ΔT , 则第 n 点时刻的滤波值(也称平滑值)为

$$\begin{aligned}\hat{x}_{n|n} &= (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n \\ &= \frac{1}{n} \cdot (x'_1 + \Delta_1) + \frac{1}{n} \cdot (x'_2 + \Delta_2) + \dots + \frac{1}{n} \cdot (x'_n + \Delta_n) = x + \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta_i\end{aligned}$$

式中: x'_1 、 x'_2 、 $\dots$ 、 x'_n 为有用信号, 这里假设它们都是相等的常数, 且用 x 表示。 Δ_1 、 $\dots$ 、 Δ_n 为各采样点的随机误差。

经过如上处理后, 显然能滤去部分随机误差。这种滤波的实质就是在所有输入采样中抽取相同的比例作为输出。在实际应用的滤波计算中, 为了尽可能地“滤”去随机误差, 保留有用信号, 并能及时地反映输入的目标运动参数的变化, 往往不采用简单的算术平均法, 而是对不同的点采用不同的加权系数。

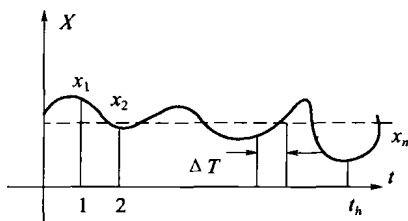


图 1.2.5 算术平均法

因此，围绕目标跟踪基本原理，在后续章节中将系统地介绍实现单目标跟踪、多目标跟踪的理论及其应用情况。

1.3 内容组织

本章围绕目标跟踪问题，介绍了目标跟踪的基本原理，论述了目标跟踪与信息融合的关系。经过几十年的发展，基本的目标跟踪理论和方法已经成熟。随着各种先进探测设备陆续投入使用，目标跟踪技术已由单传感器的目标跟踪向多传感器多目标跟踪方向发展。

因此，该书以单目标跟踪理论为主，系统地阐述了标跟踪的基本原理和基本方法，全书的内容组织如下：

第 1 章：绪论。介绍了目标跟踪基本概念和基本原理。

第 2 章：目标定位。本章的内容主要描述目标空间几何定位相关问题，这一部分内容是目标跟踪的基础。在本章中介绍了坐标系及坐标变换方法和不同坐标系间所测量数据的转换方法，描述了定位误差的度量和分析方法。上述内容不管是对单站目标跟踪，还是多站多目标跟踪同样是适用的，是设计跟踪滤波算法的基础。

第 3 章：目标跟踪。本章围绕目标跟踪这一主题，首先介绍跟踪坐标系的选择问题，通过分析不同坐标系下的目标运动模型和量测模型，指出坐标选择对目标跟踪的影响；其次，介绍数据预处理，包括野点剔除、数据压缩；然后，介绍目标各种常用的运动模型和传感器量测模型；最后，利用离散时间系统的滤波方法，实现基于上述模型的离散滤波。

第 4 章：机动目标跟踪。机动目标跟踪一直以来是目标跟踪领域中的难题之一。在系统地介绍机动目标跟踪中的机动检测自适应跟踪、机动参数辨识自适应跟踪和“全面”自适应跟踪方法。同时，结合参数辨识方法，在完成高速机动反舰导弹的飞行、攻击特性分析的基础上，结合目标机动模式的辨识技术，引入在线辨识滤波方法，介绍了基于参数辨识模型的机动目标跟踪算法。

第5章：基于纯方位的单站被动目标跟踪。本章针对水下目标被动跟踪问题，介绍了纯方位目标跟踪问题的由来，以及常用的参数估计方法，介绍了几种常用的纯方位跟踪方法，如基于方位序列的最小二乘估计、伪线性最小二乘滤波、扩展卡尔曼滤波方法。同时，介绍了该问题中的单站机动优化方法。

第6章：基于多源数据融合的目标跟踪方法。本章围绕目标跟踪中的多传感器数据融合理论及其应用，介绍了多传感器数据融合的基本概念、功能模型和结构模型，指出数据融合相关处理内容主要包括数据关联和状态融合。针对数据融合中的数据关联方法，介绍了数据关联的定义、处理过程以及关联波门和关联步骤等内容，重点介绍几种典型的关联方法，为进一步的深入学习和研究打下基础。针对状态融合问题，重点介绍了航迹及其融合方法。

第7章：目标跟踪算法的仿真与验证。本章探讨了目标跟踪系统模拟问题。首先讨论了基于协方差分析的三种系统分析方法，它们是多项式分析，Riccati方法和Cramer-Rao下界方法。这些方法在系统实验前分析与设计中非常有用，并且不需要详细的Monte Carlo仿真实验，计算简单迅速。其次，介绍了Monte Carlo仿真方法的基本思想及其设计与分析方法。一般地，当需要考虑各种复杂随机因素的影响和在系统工程实现之前，都必须采用Monte Carlo仿真来全面评估系统的性能。最后，介绍了采用计算机模拟的方法来实现目标跟踪系统模拟的设计过程。

第2章 目标定位

2.1 概 述

在现代作战环境下,敌方目标的具体位置信息十分重要,明确目标的具体位置具有以下几个方面的意义:首先,确定目标的位置有助于了解敌方的军事部署;第二,在精确定位目标之后,可以使用带有全球定位系统的具有发射后不管能力的武器来消灭目标。

长期以来,人们钟情于使用本领域的技术,一方面定位站在发射对目标照射的电磁、声等能量的条件下获取目标的位置,我们称之为有源定位,另一方面在不发射对目标照射的电磁、声等能量的条件下获取目标的位置,我们相应称之为无源定位。定位站一般指雷达、声纳、光学电视等其他可以感知目标能量、使用一些方法获取目标位置的站点。

我们首先限定定位的对象不是定位站本身,定位站本身的确定就是导航的专业范围。这里,定位的对象是目标位置的确定。

按照定位站的数量和发射能量等方面,定位可以分以下几种。

有源定位:主动雷达,主动声纳等。

无源定位:分为单站无源定位、多站无源定位,这些无源传感器包括侦察雷达、被动声纳等。

目标的方位角或目标的方位线(Linear of Bearing, LOB),是定位中经常使用到的一个参数,假设在几乎同一时刻对同一目标进行测量,测得两条或更多方位线,这些方位线可能交于一点,或不规则的多边形,作为目标位置的估计。

另一种方法是测量信号到达几个传感器的时间,即 TOA(Time of Arrival, TOA)。可用于计算定位坐标,采用该方法得到的等值线是圆形的。

第三种方法是将几个传感器测得 TOA 传给一个中心站,由该中心站计算各 TOA 之间的时间差,即 TDOA(Time Differences of Arrival, TDOA);与 TDOA 类似的是计算不同传感器与目标之间的距离差(Range Differences, RD),它等于信号在传播媒质中的传播速度与 TDOA 的乘积。

基于 TOA、TDOA 或 RD 的定位技术求得的目标的可能位置曲线是二次曲线,称为定位线(Linear of Position, LOP),以多条定位线的交点作为目标位置

因此,目标定位的技术手段有很多种,利用这些直接测量的参数或间接参数,求得目标可能位置坐标的估计,是目标定位的主要目的。该问题涉及以下内容:①目标位置的确定过程与选定的坐标系和坐标形式有关;②定位误差的度量;③定位方法及其误差度量。

目标定位,就是确定目标在某坐标系中的空间位置。对于多个不同平台,采用坐标系是不同的,定位过程中,往往要涉及到诸多坐标转换,其转换关系也较繁琐。为此,必须首先明确有关坐标系的定义及它们之间的相互关系。

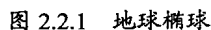
2.2.1 地球椭球知识

子午圈：包含旋转轴的平面与椭球面相截所得的椭圆。

纬圈：垂直于旋转轴的平面与椭球面相截所得的圆，也叫平行圈。

地球椭球的基本几何参数:

椭圆的第二偏心率: $e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$



8

椭球愈扁。选定了某一地球椭球后，只是确定了椭球的形状和大小，要能把地面观测元素归算到椭球面上，仅仅知道它的形状和大小是不够的，还必须确定它同大地体的相关位置以及坐标轴的方向，即确定椭球的定位和定向。具有一定的参数、定位和定向，并用来代表某一地区大地水准面的地球椭球，叫做参考椭球。一定的参考椭球确定了一定的大地坐标系。现在我国采用的坐标系一般是 WGS-84 坐标系，当需转换的坐标位于我国近海时有时也采用克拉索夫斯基椭球。

在 WGS-84 坐标系中的参数：(单位：m)

$$a = 6378137$$

$$e^2 = 0.006694379995$$

克拉索夫斯基椭球(单位：m)

$$a = 6378245.00000$$

$$b = 6356863.01877$$

$$e^2 = 0.0669342162297$$

2.2.2 常用坐标系

1. 大地坐标系

大地坐标系 $O: (B, L, H)$ 是以参考椭球中心为原点 O ，椭球旋转轴 ON 为北极，椭圆球面上任意点 k 的法线与 ON 轴共平面，这个面称大地子午面，它与椭球面的交线称为大地子午线。 G 为椭球面上选定的一点，并把过该点的大地子午面规定为起始子午面，过椭球中心 O 并与 ON 垂直的平面称为参考椭球体的赤道面，它与椭球面的交线称为参考椭球体的赤道。

K 点的法线与赤道面的交角以 B 表示，称为该点的大地纬度，由赤道面起算，北纬为正，南纬为负。 K 点的大地子午面与起始子午面的夹角以 L 表示，称为该点的大地经度，由起始子午面起算，东经为正，西经为负。此外，从 K 点沿法线到与其对应的地面点 K_0 的距离 H 称为该点的大地高。 $O: (B, L, H)$ 定义为 K_0 点的大地坐标，这样建立的坐标系称为大地坐标系，用来确定地面点的几何位置，如图 2.2.2 所示。

2. 地球坐标系

地球坐标系又称为空间直角坐标系或参心直角坐标系。原点在地球中心，各坐标轴与地球固定连接， X 、 Y 轴互相垂直并固定于赤道面上，其中 X 轴由地心向外指向格林威治子午圈与赤道的交点， Z 轴与地球自转轴重合，指向北极， Y 轴和 Z 、 X 轴构成右手坐标系，地球坐标系通常用 $e: (X_e, Y_e, Z_e)$ 表示。

3. 地理坐标系

地理坐标系 $O: (X_g, Y_g, Z_g)$ 是以地球上某一点 O 为坐标原点，建立地理直