

— · 纯距离 · —

目标运动分析及应用

王璐 梁玥 刘忠◎编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

纯距离目标运动分析及应用

王璐 梁玥 刘忠 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了纯距离目标运动分析的理论及应用等相关知识。全书共分10章,系统讨论了纯距离目标运动分析涉及的观测性分析、目标定位与跟踪算法、单站机动航路优化、静止多站站址布局优化等基础问题,并对纯距离系统在水下声学传感器中的应用进行了论述。

本书可作为高等院校相关专业的教学用书和学习参考书,也适合相关领域的科研工作者和工程技术人员阅读。

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

纯距离目标运动分析及应用 / 王璐等编著. —北京: 电子工业出版社, 2019.4
ISBN 978-7-121-25250-1

I. ①纯… II. ①王… III. ①运动目标检测—研究 IV. ①TP72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 292756 号

策划编辑: 张正梅

责任编辑: 张正梅 特约编辑: 刘炯 等

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 14.5 字数: 283 千字

版 次: 2019 年 4 月第 1 版

印 次: 2019 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

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。

本书咨询联系方式: (010) 88254757。

前言

通过获取运动目标的距离信息，并利用这些随时间变化的距离序列来实时估计目标运动参数的技术，称为纯距离目标运动分析（Range-only Target Motion Analysis, RTMA）。随着无线传感器网络的不断发展，纯距离目标运动分析在舰艇雷达组网定位、声呐浮标搜潜、舰炮射击协同式检靶等领域中得到越来越广泛的应用。由于纯距离系统本质上的强非线性以及受到应用领域中观测条件的限制，因此，关于纯距离系统的可观测条件、目标定位与跟踪算法、单站机动航路优化、静止多站站址布局优化的理论研究成果很少，尚未形成完整的体系。

本书内容正是基于此背景展开的，将纯距离目标运动分析划分为单观测站和多观测站问题，开展系统可观测性、目标定位与跟踪算法、单站机动航路优化、静止多站站址布局优化的研究，丰富了这一领域的理论研究成果，同时围绕纯距离系统在水下声学传感器中的应用进行了论述。

本书由 10 章组成，主要内容如下：

第 1 章为绪论。介绍了纯距离目标运动分析的概念、研究现状、研究热点及本书的组织结构。

第 2 章研究了单站纯距离系统的可观测性问题。建立单站纯距离系统的数学模型，给出了可观测性定义，分析观测站与目标在不同运动规律下的可观测性条件。

第 3 章研究了单站纯距离系统目标定位与跟踪算法问题。从适用性的角度出发，分别给出了基于最小二乘原理、极大似然估计原理、无迹卡尔曼滤波的改进算法。

第 4 章研究了单站机动航路优化问题。采用可观测度及几何定位散布精

度 GDOP 作为衡量目标定位跟踪精度的指标,从全局寻优与单步局部寻优角度分析了观测站在一次转向航路和匀速转弯航路时的优化航路。

第 5 章研究了多站纯距离系统的可观测性问题。建立了多站纯距离系统的数学模型,分析了影响多站纯距离系统可观测性的因素,并与多站纯方位系统、多站距离差系统可观测性条件进行了比较。

第 6 章研究了多站纯距离系统目标定位与跟踪算法问题。从适用性的角度出发,给出了“蛙跳”算法、集中融合式定位算法、基于最小二乘原理的线性迭代法与全局收敛迭代算法,以及基于简化入侵式野草优化理论的改进粒子滤波算法。

第 7 章研究了静止多站站址布局的优化问题。通过合理布局多观测站的几何位置,在观测站数量受限的情况下,建立了站址布局优化模型,提高了对目标的定位跟踪精度。

第 8 章研究了纯距离在水下声学传感器网络节点定位中的应用问题。

第 9 章研究了纯距离在水下声学传感器网络目标跟踪中的应用问题。

第 10 章设计了基于水下声学传感器网络的目标跟踪原型系统。

本书在编写过程中,得到了各级领导和机关业务部门的关心和支持。此外,电子工业出版社的支持及指导,为本书出版创造了许多便利条件,在此一并表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,参阅了许多著作和其他参考文献,在此谨向这些材料的原著作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在一些疏漏和不足,敬请批评、指正。

编著者

2018 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 纯距离目标运动分析基本概念	1
1.2 纯距离目标运动分析的研究现状	4
1.2.1 可观测性分析的研究现状	4
1.2.2 目标定位与跟踪算法的研究现状	6
1.2.3 单观测站机动航路优化的研究现状	7
1.2.4 静止多观测站站址布局优化的研究现状	7
1.2.5 基于纯距离的水下声学传感器网络节点自定位 算法的研究现状	8
1.2.6 基于纯距离的水下声学传感器网络目标跟踪算法的 研究现状	9
1.3 纯距离目标运动分析的研究热点	9
1.4 本书的组织结构	10
第 2 章 单站纯距离系统可观测性分析	12
2.1 引言	12
2.2 系统数学描述	13
2.2.1 直角坐标系下的系统数学描述	13
2.2.2 极坐标系下的系统数学描述	14
2.2.3 修正极坐标系下的系统数学描述	15
2.3 系统可观测性定义	16
2.4 系统可观测分析	17
2.4.1 观测站静止、目标静止时的系统可观测性分析	17

2.4.2	观测站静止、目标匀速直线运动时的系统可观测性分析	18
2.4.3	观测站静止、目标匀加速直线运动时的系统可观测性分析	21
2.4.4	观测站匀速直线运动、目标静止时的系统可观测性分析	21
2.4.5	观测站匀速直线运动、目标匀速直线运动时的系统可观测性分析	24
2.4.6	观测站匀速直线运动、目标匀加速直线运动时的系统可观测性分析	25
2.4.7	观测站匀加速直线运动、目标静止时的可观测性分析	25
2.4.8	观测站匀加速运动、目标匀速直线运动时的可观测分析	26
2.4.9	匀加速运动观测站、匀加速直线运动目标的可观测分析	27
2.4.10	其他结论	31
2.5	单站纯距离系统与单站纯方位系统可观测性比较	32
第 3 章	单站纯距离系统目标定位与跟踪算法研究	33
3.1	引言	33
3.2	系统数学模型	34
3.3	基于最小二乘原理的目标参数估计算法	36
3.3.1	递推格式的目标参数估计算法	36
3.3.2	基于全局收敛策略的目标参数估计算法	40
3.4	基于极大似然原理的目标参数估计算法	48
3.4.1	单站纯距离系统的极大似然估计	48
3.4.2	基于全局收敛策略的改进算法	51
3.4.3	仿真试验及分析	52
3.5	UKF 算法的基本原理	57
3.5.1	UT 变换	57
3.5.2	标准 UKF 算法	58
3.5.3	迭代 UKF 算法	59
3.5.4	仿真试验及分析	60
3.6	自适应迭代 UKF 算法	63
3.6.1	自适应迭代 UKF 算法步骤	63
3.6.2	仿真试验及分析	64

第 4 章 单站机动航路优化研究	70
4.1 引言	70
4.2 观测站匀速直线一次转向机动时的可观测度分析	71
4.2.1 可观测度的定义	71
4.2.2 仿真试验及分析	72
4.3 单站纯距离测量模型的 CRLB	74
4.3.1 定位与跟踪误差下限	74
4.3.2 单站纯距离测量模型 CRLB 计算	76
4.4 观测站机动航路优化研究	78
4.4.1 航路优化问题的提出	78
4.4.2 匀速直线一次转向机动优化航路	79
4.4.3 匀速转弯机动优化航路	82
4.5 航路优化的方法	85
第 5 章 多站纯距离系统可观测性分析	87
5.1 引言	87
5.2 多站纯距离系统的数学描述及可观测性定义	87
5.2.1 直角坐标系下的系统描述	87
5.2.2 多站纯距离系统可观测性的定义	88
5.3 多站纯距离系统可观测性分析	89
5.3.1 可观测性分析	89
5.3.2 多站纯距离系统与多站纯方位系统可观测性比较	93
5.3.3 多站纯距离系统与多站距离差系统可观测性比较	93
第 6 章 多站纯距离系统目标定位与跟踪算法研究	95
6.1 引言	95
6.2 “蛙跳”算法	96
6.2.1 “蛙跳”算法原理	96
6.2.2 仿真试验及分析	97
6.3 集中融合式定位算法	99
6.3.1 集中融合式定位算法原理	99
6.3.2 仿真试验及分析	101
6.3.3 与多站 TDOA 定位精度比较	103

6.4	基于最小二乘原理的定位算法	108
6.4.1	多观测站最小二乘定位原理	108
6.4.2	线性近似法	109
6.4.3	基于全局收敛策略的牛顿迭代算法	109
6.4.4	仿真试验及分析	110
6.5	改进粒子滤波算法	111
6.5.1	标准粒子滤波算法基本原理	111
6.5.2	粒子滤波算法存在的主要问题	115
6.5.3	基于遗传算法的改进粒子滤波算法	116
6.5.4	基于简化入侵式野草优化理论的改进粒子滤波算法	121
第 7 章	静止多站站址布局优化研究	130
7.1	引言	130
7.2	定位误差分析	131
7.3	三站站址布局模型	133
7.3.1	观测站相对位置对定位精度的影响	133
7.3.2	测距误差对定位精度的影响	137
7.3.3	站址误差对定位精度的影响	138
7.3.4	目标高度对定位精度的影响	139
7.3.5	仿真分析	139
7.4	站址布局优化	140
7.4.1	站址布局优化问题的提出	140
7.4.2	站址布局优化模型	141
7.4.3	仿真试验及分析	142
第 8 章	基于纯距离的水下声学传感器网络节点定位算法	145
8.1	引言	145
8.2	节点定位问题描述与节点定位算法	147
8.2.1	节点定位问题与节点定位算法的分类	147
8.2.2	基本节点定位算法	149
8.2.3	节点定位算法的评价指标	150
8.2.4	水下声学传感器网络中基于 TOA 的测距	153
8.3	自组织过程中的数据传播算法	154
8.3.1	基于深度优先遍历的数据传播算法	155

8.3.2 分布式的并发无冲突数据传播算法	157
8.4 考虑局部拓扑关系的分布式节点定位算法	160
8.4.1 基本原理	161
8.4.2 Layer-TERRAIN	162
8.4.3 试验及分析	167
第 9 章 基于纯距离的水下声学传感器网络目标跟踪算法	169
9.1 引言	169
9.2 测距的可实现性	170
9.2.1 单目标的声强测距模型	170
9.2.2 多目标的声强测距模型	171
9.3 分布式跟踪系统结构	171
9.3.1 动态簇的组建	171
9.3.2 基于动态簇的目标跟踪过程	174
9.4 基于粒子滤波的分布式目标跟踪算法	175
9.4.1 基于加权质心的预处理机制	175
9.4.2 分布式粒子滤波算法	176
9.5 基于量化观测理论的改进粒子滤波算法	181
9.5.1 量化估计原理	182
9.5.2 试验与分析	183
第 10 章 水下声学传感器网络目标跟踪原型系统	186
10.1 引言	186
10.2 水声节点硬件结构	187
10.2.1 水声通信模块主要功能	187
10.2.2 水声通信模块结构	188
10.3 软件体系结构	190
10.3.1 网络结构组件	192
10.3.2 数据库管理算法	196
10.3.3 数据融合算法	197
10.3.4 路由协议	198
10.4 原型系统	199
参考文献	201



1.1 纯距离目标运动分析基本概念

纯距离目标运动分析也称为纯距离目标定位与跟踪,其本质是通过直接或间接手段获得观测站与目标之间的距离信息,并利用这些随时间变化的距离序列实时估计目标运动参数(位置、速度、航向、方位等)的方法。观测站与目标之间的距离信息一般是通过测量观测站与目标之间信号传递的时间(主要利用脉冲测量、扩频测距技术或相位测量等技术获得)计算得来的,因此纯距离目标定位方法也称为 TOA 方法(Time of Arrival, TOA)。TOA 定位方式要求观测站之间、观测站与目标之间时钟统一,所以纯距离定位更适合应用于协作目标之间的协同定位,借助高精度时间同步技术,通过电缆延迟测算、统一授时,可以实现精确时钟同步(误差可达 $\pm 80\text{ps}$)。近年来,随着海军网络战的发展,纯距离问题在潜艇隐蔽协同攻击系统的水声传感器网络自组织、目标定位与跟踪等方面具有重要的应用价值。

高技术条件下,潜艇受到敌空中、水面、水下的“立体”威胁,由于水下隐蔽通信手段的限制,潜艇往往采用单艇独立作战的模式,独立完成目标探测、定位与跟踪、占位机动、武器射击和规避机动的过程。随着敌反潜能力的提高,使得单艘潜艇实施隐蔽作战变得越来越困难,不能做到与敌编队相抗衡。在纯方位测量条件下,单艇独立作战的局限性如表 1-1 所示^[1]。

表 1-1 单艇独立作战的局限性

主要侧面	主要问题
静=低速航行	潜艇在纯方位观测条件下，为达到对目标状态的稳定跟踪，航速不能低于 6~8 节，此时潜艇噪声较大，无法满足“静”的要求
快=快速攻击	攻击事件主要取决于对目标跟踪达到稳态所需要的收敛时间。潜艇速度越快，获得的方位变化率越大，跟踪收敛越快。在 6~8 节航速，目标初始距离 20km，解算时间通常要 20min，而且即使在潜艇的水下极限航速下，也需要 10 多分钟，与“快”的要求相距甚远
远=远距离攻击	单艇为达到对目标状态的稳定跟踪，一般要做接敌运动，经过十几分钟后，相对目标的距离较近，一般在 10km 左右，丧失了“远”距离攻击的条件
准=精确打击	当不考虑武器等客观因素，在目前声呐性能的约束下，纯方位是一个典型的非线性问题，传统的拟线性算法的距离解算相对精度在 10%左右，远距离条件下显然失“准”

倘若将多艘潜艇组织起来，进行协同隐蔽水下攻击，则可以突破敌反潜屏障，相互配合取得较好的作战效果，进而大幅度提高潜艇的攻击能力，“静、快、远、准”地打击敌人，并且有效地保存自己。在这一过程中，实现水下隐蔽协同作战最为关键。

水下协同作战是指潜艇指挥控制系统通过电磁和水声信道，从（向）其他潜艇、水面舰艇、岸基指挥所、各种配合侦察兵力等，隐蔽协同地获取（传递）信息，完成对目标进行武器攻击的过程。这种作战方式不仅能够使潜艇观测目标的能力多层化，而且可以使潜艇与海军其他兵力配合实施整体打击，从而大幅提升我海军潜艇部队的作战效能，主要表现在如下方面^[2]：

（1）节点与节点之间、节点与潜艇之间利用短距离水声通信的方式实现信息交互，节点之间传递距离信息，完成网络的自组织和自定位，这减少了水声通信的暴露范围，实现了潜艇间的隐蔽协同；利用这种协同，可以保证各艘潜艇在零航速的运行状态下，仍能对敌目标进行精确定位，实现了“安静”的要求。

（2）理论分析表明，多站被动定位问题可以等效成一个“蛙跳”的单站问题，即可以看成一艘高速机动的“安静”潜艇实现对目标定位跟踪的过程^[3]；同时，以传感器网络的前方节点作为直接的观测点，感知与目标之间的距离信息，可以大幅度提高目标运动参数的解算时间和求解精度，实现“快速、精确”的要求。

（3）考虑到潜艇受到能源、供给等因素的限制，在执行远海侦察、攻击任务时，通过给上述某些节点加装武器系统（鱼雷、水雷）等，形成攻击节点，扩展成为一种水下战术系统进行使用，利用多节点联合定位跟踪算法解算得到敌目标参数，为攻击节点提供目标指示，进而发动攻击，这可以使潜艇远离作战区域，进一步提高了安全性。

基于水下自组织网络的潜艇隐蔽协同作战系统以声学传感器网络作为水下潜艇通信的骨干网络，利用短距离多跳的通信方式自组织成网络，实现各作战单元间的实时通信，从而在作战编队内进行充分的战场信息交换，形成统一的作战态势和协同攻击策略，使潜艇编队在各种复杂的作战环境下，都具有良好的协同作战能力。潜艇隐蔽协同攻击示意图如图 1-1 所示。

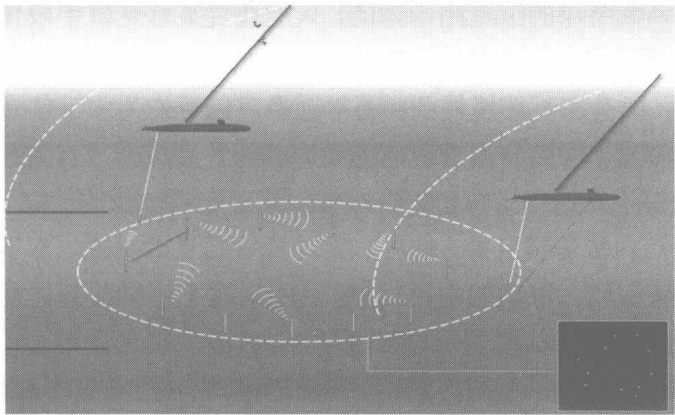


图 1-1 潜艇隐蔽协同攻击示意图

在这样一个复杂的系统中，水声传感器网络的研究是系统的研究基础。水声传感器网络的节点通常由飞机、潜艇或水面舰艇随机放到感兴趣的水域，节点通过短距离多跳的通信方式自组织成网，协作的感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息，并发送给接收者^[4]。水下声学传感器网络（水声网）与无线传感器网络特性的比较如表 1-2 所示。

表 1-2 水声网与无线传感器网络特性的比较

典型特征	自组织射频网	自组织水声网
节点数	10~200	5~500
节点可移动性	高	低
节点间距	1~200m	500~5000m
节点连接密度	1~10/节点	1~3/节点
节点丢失频率	高	低
信道质量	高	中等
平均延迟	0.1~0.5s	10~100s

水下声学传感器网络除具备一般自组织网络的性质外，还具有如下特点^[5-7]：

- (1) 通信能力有限。
- (2) 节点数量多。

(3) 网络拓扑结构变化频繁。

(4) 计算和存储能力有限。

(5) 能量有限。

节点定位问题是水声传感器网络研究中的一个重要问题。由于节点具有小体积、低能耗和低成本的特点,布放到待监测的区域时,不能为每个节点安装 GPS 系统,因此大多数节点的位置是未知的,只能通过某些定位手段使部分节点首先获得自身的位置信息,然后根据这些已知位置的节点,完成整个网络节点的自定位过程。同时,由于水下环境复杂,通常选择声信号作为水下信息传递的主要载体,通过计算时延,间接获得节点间的距离信息,完成节点自定位过程。此时若通过测量角度等手段进行定位,需要为每个节点安装额外的接收装置,不符合节点小体积的特点,易暴露自身。此外,受洋流等因素的干扰,水下传感器的姿态不稳,不容易获得较为准确的角度信息。因此,水下声学传感器网络的节点自定位过程是以距离为观测信息的定位过程。

以距离为观测信息的定位与跟踪还有很多其他方面的应用。如在舰炮射击协同式检靶系统中,纯距离定位因其独特优势,得到越来越广泛的应用。

中大口径舰炮担负着打击水面舰船、岛/岸目标的任务,同时具有一定的拦截来袭飞航式导弹、固定翼飞机、直升机和其他空中目标的能力,在岛礁争夺等海上作战和护航等国家海洋权益维护方面发挥着重要作用^[8]。目前中大口径舰炮实弹射击训练脱靶量检测,基本采用人工方式,不可避免地存在测量和操作误差,评估结果不客观。为实现实时自动精确检靶,引入了无线传感器网络技术,通过测量加装合作声学信标的目标,采用协作定位模式,利用纯距离信息对弹丸进行准确定位跟踪。

1.2 纯距离目标运动分析的研究现状

与纯方位及 TDOA 定位方法已取得相对丰富的理论研究成果不同^[9-13],目前关于纯距离目标运动分析的理论成果很少,尚未形成系统的理论体系。

1.2.1 可观测性分析的研究现状

纯距离系统的可观测性条件研究是纯距离目标运动分析理论研究的基础,只有在满足系统可观测的前提下,进一步研究目标定位与跟踪算法、单观测站的机

动航路优化、多观测站的站址布局优化等问题才有意义,而且系统对目标实现定位与跟踪的精度、收敛速度及稳定性,在很大程度上受系统本身可观测性的影响。

国外关于可观测性分析的研究始于1981年,最初是S.C.Nordoñe和V.J.Aidala在二维平面内通过对观测方程进行伪线性化的方法,得出了纯方位系统中关于匀速直线运动目标的可观测性结论^[14],1985年,S.E.Hammel和V.J.Aidala在此结论的基础上进行了三维空间的扩展^[15],但是利用伪线性方法得到的目标状态估计是有偏的。1988年,E.Fogel和M.Gavish在三维平面内,通过建立 N 阶目标运动方程,在连续时间域内得到了系统可观测性的充分必要条件,同时也指出利用微分方程得到的可观测性条件是必要的,非充分的。但是该方法具有一定的局限性,面对较为复杂的运动模型,如Singer模型时,就不能再使用多项式方程的形式描述目标运动状态^[16]。1996年,T.L.Song在三维平面内,通过建立伪测量方程,得到了在一般条件下系统可观测的充分必要条件^[17],克服了上述方法的不足。同时该文献也指出,由于是在直角坐标系下建立数学模型,所得结论缺少状态变量和系统可观测性之间的直接关系,很难评估在系统可观测性条件不满足时,哪个状态变量是不能观测的,因此通过观测站机动提高系统的可观测性也变得十分困难。同年,T.L.Song在修正极坐标系下分析了系统的可观测性,并且在修正极坐标下得到的目标状态估计器是渐进无偏的^[18]。此后,研究学者进一步深入研究分析各类系统可观测性条件的方法,丰富和完善了系统的可观测性理论成果^[19-26]。

国内学者对于系统可观测性的研究始于1977年,且主要是针对纯方位系统展开研究。刘忠对匀速直线运动单观测站纯方位系统的可观测性进行了研究,得出了目标部分状态参数(相对航向、相对速度与初距之比)可观的结论^[27],此后又对纯方位系统不可观测的情形进行了详细的研究分析,形成了比较完整的关于纯方位系统不可观测性的结论^[10]。李洪瑞对观测方程进行线性化近似,通过推导Grammer矩阵行列式的解析表达式,得到纯方位系统可观测性的充要条件^[28],并详细分析了连续纯方位系统不可观测时,观测站可能的运动轨迹有哪些,为约束条件下观测站的机动提供了依据^[29]。国内学者石章松、许兆鹏、吕文亭等又陆续对多站纯方位系统、三维空间内纯方位系统的可观测性条件进行了研究^[30-33],目前关于纯方位系统的可观测性研究已形成比较丰富的理论成果。

但是,上述有关系统可观测性研究分析的相关方法和结论,主要针对纯方位系统或利用多源测量信息(如频率、时延)的无源定位系统,可公开参阅的关于纯距离系统可观测性的文献很少。

1.2.2 目标定位与跟踪算法的研究现状

纯距离系统的目标定位与跟踪问题属于非线性滤波问题,而非线性滤波理论的发展可以划分为线性化近似和非线性化近似两个阶段。在线性化近似的发展阶段,扩展卡尔曼滤波算法(Extended Kalman Filter, EKF)^[34]及其各类改进算法^[35-42]是学者研究的重点。而后,非线性滤波理论的发展进入了非线性化近似的发展阶段,提出了无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)^[43-61]、粒子滤波(Particle Filter, PF)^[62-71]等算法。

其中,UKF 算法采用确定性采样策略,通过无迹变换来近似高斯随机变量在非线性系统中的传递^[45],可以更好地近似随机变量经过非线性变化后的均值和方差,其估计性能优于 EKF 算法。然而,在实际应用中,UKF 算法仍然存在滤波收敛速度、精度等问题^[58]。针对这些问题,各种改进 UKF 算法陆续提出。R.Meiwe 在 2001 年提出了平方根无迹卡尔曼滤波算法^[72],在递推计算中将协方差替换为协方差的平方根,有效地解决了由于协方差负定导致的滤波发散的问题。R.Zhan 在 2007 年提出了迭代无迹卡尔曼滤波算法(Iterated Unscented Kalman Filter, IUKF)^[73],通过迭代重新采样提高非线性近似程度,进一步改善了滤波效果。国内学者石勇在 2011 年提出了自适应 UKF 算法,为了得到未知系统噪声的统计特性,提出了改进的 Sage-Husa 估计器,在满足在线估计系统噪声统计特性的同时,判断并抑制了滤波发散的情况,因而有效地提高了滤波算法的精度和稳定性^[74]。

与 UKF 算法的确定性采样不同,PF 算法采用随机采样策略,通过产生大量表示系统状态变量的附带权值的粒子,利用特定的统计策略组合估计关于状态变量的概率密度函数。但是 PF 算法存在权值退化和粒子集匮乏的问题,因此关于 PF 的改进策略一直是研究学者的热点,出现了如 Unscented 粒子滤波算法^[75]、高斯和粒子滤波算法^[76]、辅助粒子滤波算法^[77]、Marginalized 粒子滤波方法^[78]等方法。薛锋提出了约束条件下的粒子滤波算法^[79],并将其成功应用于纯方位目标定位与跟踪中;梁玥提出了基于遗传算法的改进粒子滤波算法,通过使用选择算子、交叉算子及变异算子,改进了算法的性能^[80];宁小磊提出了加权逼近粒子滤波算法^[81],通过对预测粒子集样本进行预处理,增加了有效样本数,有效解决了粒子多样性退化的问题。

但是,上述非线性滤波算法大多应用于纯方位系统,并未在纯距离系统中得到应用。

1.2.3 单观测站机动航路优化的研究现状

从20世纪90年代开始,国内外学者在研究纯方位系统可观测性条件及目标定位与跟踪算法时发现,观测站机动航路与系统可观测性、目标定位与跟踪精度之间有很大的关系,选择合适或优化的机动航路不仅可以改变系统的可观测性,而且可以提高目标定位与跟踪算法的性能^[82-96]。

从1989年开始,国外学者 S.E.Hammel、P.T.Liu 和 J.P.Helferty 等人对观测站的机动航路优化问题进行了深入研究,先后提出了定位误差的椭圆面积最大和最小化定位误差的下界的评价性能指标,得出了匀速运动的单观测站对静止目标的优化航路是前置追击曲线的结论,其中,定位误差的椭圆面积可用 Fisher 信息矩阵 (Fisher Information Matrix, FIM) 行列式的值来表示,最小化定位误差的下界可用克拉美罗下限 (Cramer-Rao Low Bound, CRLB) 的迹来表示。1998 年, J.M.Passerieux 和 D.V.Cappel 提出了两种优化性能指标:最优化全局精度 $-\ln[\det\{FIM\}]$ 和距离精度 $h' \cdot (FIM)^{-1} \cdot h$, 通过构造 Hamilton 函数,得到了二维平面内利用测向信息对匀速运动目标定位与跟踪的最优运动轨迹是曲折臂 (Multi-leg) 曲线的结论^[87]。1999 年 O.Tremoie 和 L.J.Cadre^[88,89] 采用外代数理论,通过分解 FIM 矩阵,得出观测站机动航路的最优速度应该是观测站具备最大速度的结论。

国内开展观测站机动航路优化问题研究主要经历了两个阶段^[27,28,97,98],一是定性阶段,主要是根据经验制定观测站航路的机动方案;二是定量阶段,开始定量地计算目标定位精度与机动航路优化之间的关系问题。董志荣提出了纯方位系统定位与跟踪的本载体最优轨线方程^[97];石章松基于目标定位跟踪精度下限 CRLB,提出使用定位精度的几何解释 (Geometrical Dilution of precision, GDOP) 作为优化性能指标,采用数值寻优计算的方法,对纯方位目标跟踪中的观测器航路机动优化进行了研究^[99,100];张武基于最优控制理论建立最优观测者轨迹的优化模型^[101],运用解析法得到全局精度指标下常速率观测者最优航向的必要条件。

但是,以上研究都是针对纯方位系统展开的,并未涉及对纯距离系统航路优化的研究。

1.2.4 静止多观测站站址布局优化的研究现状

多观测站协同定位可以利用多个静止观测站,从不同方向同时探测目标,从而提高目标定位与跟踪的精度和速度。但是观测站与目标、观测站与观测站之间