

# 不确定条件下 单站无源定位技术

杨晓君 沈涛 王榕 秦伟伟 著

BUQUEDING TIAOJIANXIA  
DANZHAN WUYUAN DINGWEI JISHU

西北工业大学出版社

# 不确定条件下 单站无源定位技术

杨晓君 沈 涛 著  
王 榕 秦伟伟

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 单站无源定位技术是一种定位设备本身并不主动发射信号,而是仅依靠分析所接收的辐射源的信息,来实现目标定位的技术。该技术具有电磁隐蔽性好、结构简单、安全性高等优点。针对现有单站无源定位方法需要建立准确模型,不能较好地解决不确定条件下的无源定位问题,本书在介绍现有国内外单站无源定位方法的基础上,着重介绍了不确定条件下单站无源定位方法,详细阐述了无源定位体制、模糊可能性分布、模糊滤波、高非线性系统定位等方面的研究成果;进一步将无源导航应用到飞行器导航中。

本书可供从事信号与信息处理、无源定位、状态估计、模糊不确定等方面的科研人员和该专业方向的研究生学习、研究使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

不确定条件下单站无源定位技术/杨晓君等著. —西安:西北工业大学出版社,2015.8

ISBN 978-7-5612-4534-7

I. ①不… II. ①杨… III. ①无源定位—研究 IV. ①TN971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 194996 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印刷者:陕西天意印务有限责任公司

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32

印 张:5.875

字 数:108 千字

版 次:2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价:38.00 元

# 前 言

单站无源定位与跟踪系统具有电磁隐蔽性好、结构简单、安全性高等优点,在军事领域中具有广泛的应用前景,在导航、定位和跟踪等领域起着重要的作用,因此,引起了越来越多人的重视。近 10 年来,这一技术得到了进一步的发展,新的定位体制和滤波跟踪方法被提出。然而,现有的单站无源定位方法都是建立在概率基础上的,需要大量的统计样本(实际很难得到)。另外,能得到的信息只能是不精确的专家知识和经验数据,存在着大量的“可能”“大概”等知识,这些知识无法用计算机进行描述。

模糊数学(方法)是一种新兴的分析方法,其目的就是利用模糊集合来表示一些模糊信息。与普通系统相比,模糊系统具有以下优点:模糊逻辑具有较好的非线性处理能力,对先验知识要求较少,不需要建立确切的模型,只需要定性的知识等。本书在介绍现有国内外无源定位方法的基础上,对模糊单站无源定位系统进行了深入的研究,建立了一种新的模糊单站无源定位系统模型。在此模型下,重点介绍笔者在单站无源定位方法、模糊无源定位以及高非线性下的无源定位等方面的研究成果。

全书共分 5 章。第 1 章是绪论,阐述本书的研究背景和意义,全面而系统地分析了无源定位方法的国内外发展现状,提出了单站无源定位研究领域一些亟待解决的问题,确立了本书的研究内容和研究思路。第 2 章分析了现有单站无源定位方法的不足,建立了一种新的模糊单站无源定位框架,推导了模糊条件下的非线性最小二乘估计,提出了一种模糊单站无源定位方法。第 3 章基于运动学原理,利用相位差、相位差变化率和频率变化率观测信息,提出了一种新的单站无源定位体制(PFRC),并分别推导了二维平面目标和三

维空间目标的定位与跟踪原理,详细研究了该单站无源定位算法的可观测性原理、测距误差和最优估计。第4章为了减少高非线性系统的线性化误差,基于最大后验概率准则,推导了迭代模糊扩展Kalman滤波方法(IFEKF),并证明该迭代方法是高斯-牛顿法的一种应用。第5章研究了模糊单站无源定位方法在导航中的应用,提出了一种无源导航的思路。进一步,给出了一种新的组合导航方式,从而提高了导航精度。

目前,无源定位技术发展迅速,在军事和民用中都得到了广泛应用。随着对无源定位技术研究的不断深入,相关知识也将进一步发展,本书不可能覆盖所有内容,但愿可以起到抛砖引玉的作用。

感谢第二炮兵工程大学和清华大学的邹红星、刘刚、周志杰、郭金库、汪红桥、樊红东、胡来红、黄拳章、何兵、孙振生等老师和同学的帮助。本书的出版得到了国家自然科学基金(61304240、61401471)、中国博士后科学基金(2014M552589、2014M562636)、中国博士后特别资助(2015T81114)等项目的资助。撰写本书曾参阅了相关文献资料,在此,谨向其作者深致谢忱。

由于水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者和专家多多指正,不胜感激。

著 者

2015年6月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 课题研究背景和意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.3 模糊单站无源定位有关问题 .....	9
1.4 本书的主要研究内容和结构安排.....	17
<b>第 2 章 存在模糊不确定性的单站无源定位</b> .....	20
2.1 引言.....	20
2.2 问题描述.....	23
2.3 模糊集合.....	24
2.4 模糊单站无源定位系统.....	34
2.5 模糊单站无源定位数值仿真.....	41
2.6 小结.....	45
<b>第 3 章 基于相位差、相位差变化率和频率变化率的模糊单站     无源定位方法</b> .....	47
3.1 引言.....	47
3.2 现有单站无源定位方法.....	49
3.3 基于相位差、相位差变化率和频率变化率的单站无源 定位与跟踪原理.....	56
3.4 可观测分析.....	68
3.5 测距误差分析.....	73
3.6 定位与跟踪的最优估计.....	75

3.7	模糊单站无源定位方法·····	79
3.8	仿真·····	81
3.9	小结·····	90
	附录·····	91
<b>第4章</b>	<b>高非线性系统的模糊单站无源定位方法</b> ·····	<b>95</b>
4.1	模糊扩展 Kalman 的线性化误差分析·····	95
4.2	迭代扩展 Kalman 滤波·····	97
4.3	高非线性系统的模糊单站无源定位方法·····	98
4.4	仿真·····	108
4.5	小结·····	127
	附录·····	128
<b>第5章</b>	<b>模糊单站无源定位在组合导航中的应用</b> ·····	<b>135</b>
5.1	引言·····	135
5.2	信息融合·····	137
5.3	无源导航·····	142
5.4	组合导航系统设计与仿真·····	144
5.5	小结·····	157
	<b>参考文献</b> ·····	<b>159</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 课题研究背景和意义

雷达等有源定位技术具有全天候和高精度的优点,但由于需要自身发射电磁波,因此容易暴露自己,被对方干扰,甚至被摧毁。特别是 20 世纪 60 年代以来,反辐射导弹的出现和使用,对雷达等有源设备的生存构成了严重的威胁。一方面,为了弥补有源定位方法的不足,人们在积极改进有源定位方法的同时,开始了无源定位方法的研究;另一方面,为了提高电子情报侦察能力,增强电子干扰设备的对抗能力,提高火控武器的作战能力,也需要进行无源定位研究。因此,对辐射源的无源定位技术的研究,引起了人们的重视,并形成了一股热潮。

无源定位技术<sup>[1-3]</sup>是一种定位设备本身并不主动发射信号,而是仅依靠分析所接收的辐射源的信息,来实现目标定位的技术。它可以利用未知位置的辐射源的辐射信息,确定出该辐射源的类型和辐射源的空间或地理位置;或利用已知地理位置的辐射源来确定航行中物体的空间或地理位置,这也是导航和制导定位中的一项重要的技术手段。与有源定位方法相比,无源定位方法



具有隐蔽接收、不易被对方发觉的优点；又因为无源定位观测站接收直接来自目标辐射源的信号，具有信噪比高的优点，因此又具有探测距离远的优点。无源定位技术在现代一体化防空系统、机载对地对海攻击、对隐身目标的远程预警系统方面有十分重要的应用，对于提高系统在电子战环境下的生存能力和作战能力具有重要作用，同时在航海、航空、宇航、侦察、测控、救援和地球物理学研究中也扮演着重要的角色。

现有的无源定位大多是多站无源定位，即由多个空间上分散配置平台上的接收机同时对辐射源信号进行接收处理，从而确定出多个定位曲面（如平面、双曲面、球面等），并通过这些曲面相交，得到目标的位置。它主要利用不同平台定位曲面之间差异较大这一特点来定位，因此具有速度快、精度高等优点。但是，多站无源定位是靠多平台之间的协同工作，需要进行的大量数据传输，因此，多站无源定位系统相对较复杂，且当系统平台需要机动时，系统的复杂性更高<sup>[4]</sup>。单站无源定位技术，是指利用一个观测平台上的单个或多个接收机，对目标辐射源进行定位和跟踪的技术。该技术避免了多个观测平台之间的同步工作和数据传输，具有灵活性大、结构简单和易于工程实现等优点。本书以单站无源定位为研究背景。

## 1.2 国内外研究现状

科学进步和实战需要推动了无源定位技术的发展，引起了国

内外的高度重视。目前,已有很多机构开始了这方面的研究。为了介绍方便,根据接收辐射源信息的类型,将无源定位系统分为两大类:一类是基于外辐射源的无源定位系统<sup>[5-8]</sup>,辐射源包括雷达、广播电视、卫星通信和移动通信信号等,其中,根据外辐射源的从属关系,可将基于外辐射源的无源定位系统分为合作式无源定位系统和非合作式无源定位系统;另一类是基于目标辐射源的无源定位系统<sup>[9-10]</sup>,辐射源包括雷达、通信、干扰和热量等,其中根据定位对象的不同,可将基于目标辐射源的无源定位系统分为无源定位和无源导航<sup>[11]</sup>。

### 1.2.1 基于外辐射源信号的无源定位系统

基于外辐射源的无源定位系统是指通过接收除目标外的照射源辐射信号的直达波和经过目标反射后的回波来获取目标信息的系统。可能利用的外辐射源有雷达信号、广播信号(调频、调幅、数字音频广播)、电视信号(模拟电视、数字电视)、移动通信(GSM, CDMA)信号、卫星(GPS等)信号、手机基站信号等。

该无源定位系统具有下述优点。

- (1) 造价低廉、抗干扰性强、隐蔽性好、不易被摧毁;
- (2) 各种广播电台等外辐射源分布广泛,探测系统的布站比较灵活,可以通过组网来提高协同作战的能力;
- (3) 该系统的天线都设置在贴近地面的高处,这对探测低空飞行的飞机和巡航导弹十分有利;

(4)工作频率比较低,具有较好的反隐性。

### 1. 合作式无源雷达

合作式无源雷达就是传统双(多)基地雷达,其发射站和接收站在不同的位置。早期的雷达体制都是双基地雷达。1922年,美国海军研究实验室(NRL)的 Taylor 博士和其助手 Young,采用类似于现在的双基地连续波雷达的设备,探测到正在河中航行的木制船<sup>[12]</sup>。第一次世界大战中,德国首先将 Klein - Heidelberg<sup>[13]</sup>应用于战争。这套设备接收来自英国的海岸防空雷达 ChainHome 的直射信号和来自目标的反射信号,通过测量两信号的时间差和测量反射信号的到达角来定位目标。

但自 1936 年发明了天线收发开关和 1940 年出现大功率脉冲磁控管后,雷达的发展主要集中在单基地雷达。直至 20 世纪五六十年代,为了对付“四大威胁”的挑战,双(多)基地雷达再次受到广泛的重视和研究。如:英国 Plessey 公司研制的近程警戒双基地雷达系统、伦敦大学工学院的双基地雷达试验系统;美国的“圣殿”(Sanctuary)防空双基地雷达系统、战术双基地雷达验证(TBIRD)系统、双基地报警和指示(BAC)系统、多基地测量系统(MMS);俄罗斯的 Barrier 雷达等<sup>[14]</sup>。

### 2. 非合作式无源定位系统

非合作式无源定位系统采用机会发射源,其中包括电视、广播等民用辐射源。英、美、德等国的非合作式无源定位系统研究处于世界领先水平;英国主要研究基于电视信号的探测系统,美

国主要研究基于调频广播信号的目标探测系统,德国主要研究基于手机信号的目标探测系统。

(1)基于广播信号的无源定位系统。华盛顿大学遥感研究小组 John D. Sahr 等人研究了用于探测电离层等离子体波动的 MRR(Manastash Ridge Radar)多基地被动探测系统<sup>[12]</sup>。美国华盛顿大学 Peter B.<sup>[15]</sup>设计了一种电离层无源成像系统,该系统采用广播信号(88~108 MHz)为发射源,通过接收电离层的反射信号来探测地球电离层的波动。

真正达到实用化、商业化的是美国 Lockheed Martin 公司在 1998 年研制出的沉默哨兵(Silent Sentry)<sup>[16]</sup>系统,并以 Gaithersburg 的调频广播电台为辐射源进行了验证性试验。Silent Sentry 系统成功地跟踪了在 Baltimore - Washington 国际机场起落的飞机。

(2)基于电视信号的无源定位系统。1982 年,伦敦大学的 Griffith 和 Long<sup>[17]</sup>发表了基于电视信号的双基地雷达系统方面的文献。1999 年,英国的 P. E. Howland<sup>[18]</sup>博士发表了基于电视信号的非合作式双基雷达深入研究的成果。该试验系统是以 Crystal Palace 电视台为发射机,接收机工作在 VHF/UHF 电视频段,以目标方向和多普勒频移为观测信息,并采用 Kalman 滤波算法完成目标定位与跟踪的。

法国 ONERA 的 Poulli 和 Lesturgie<sup>[19]</sup>描述的系统仅利用单一的多普勒信息对目标进行定位和跟踪目标。每个目标对应每

个发射台都有一个多普勒频移,通过多个发射台建立一个联立方程组,从而实现对目标定位。该系统的不足是只能探测和跟踪近距离目标。另外,法国的 Carrara 和 Tourtier<sup>[20]</sup>开展了利用高清晰度电视系统中的频率分集多元数字波形的研究。

(3)基于卫星信号的无源定位系统。德国 Diehl GmH&Co 公司对利用 GPS 系统作为照射源的无源防空多基地雷达系统进行了研究;芬兰技术研究中心研制了以法国电视直播卫星作为照射源的 SODAR 系统。另外,Griffiths<sup>[21]</sup>等人研究了利用“马可波罗一号”电视直播卫星作为辐射源的定位系统;Volker Koch<sup>[22]</sup>等人在 1995 年雷达国际会议上,提出了利用 GPS 进行被动定位的方法;McIntosh 和 Tsui<sup>[23]</sup>分别于 1999 年和 2000 年发明了利用 GPS 和 GLONASS 卫星信号作为照射源的无源探测系统专利。

(4)基于手机信号的无源雷达。2002 年,德国罗克·马诺尔研究公司测试了一种试验型的多基无源雷达——手机雷达 (CELLDAR)<sup>[24]</sup>。该雷达使用移动通信信号,可对陆上、海上和空中的运动目标进行跟踪。为了获得更精确的目标参数,U. M. D. Mendi 和 B. K. Sarkar<sup>[25]</sup>采用两个 GSM 基站来对地面目标进行定位。2007 年,新加坡南洋理工大学的 Y. L. Lu<sup>[26]</sup>等人展示了一种基于多信道 GSM 雷达的试验结果。该系统采用 4 个振子天线,4 个 GSM 信道,获得了较为准确的距离、多普勒和方向信息。

目前,国内关于基于外辐射源信号的无源雷达的研究已经十分深入,南京电子技术研究所、国防科技大学、东南大学以及上海航天技术研究院等院所正在从事基于电视/调频信号的无源定位技术的研究,但大多处于理论和实验阶段。

### 1.2.2 基于目标辐射信号的无源定位系统

基于目标自身辐射信号的无源定位系统,是指该系统通过目标自身辐射信号,利用信号处理的方法获得辐射信号的信息参数,如角度、多普勒、频率等,通过这些信息参数来实现目标的定位和跟踪。这类无源定位系统的突出优点是作用距离不受雷达截面积的影响,具备较强的信号适应能力和抗干扰能力,但当战时敌方目标采用无线电静默或远区静默时,基于目标辐射信号的无源定位系统就无法发现目标。

#### 1. 无源定位

基于目标辐射信号的无源定位系统主要有<sup>[27]</sup>:捷克的“塔玛拉”雷达及其车载型“维拉-E”雷达;以色列的 EL/L8300G 和俄罗斯的“卡尔秋塔”,两者的基本配置都由 3 个传感器组成,通过测向交叉对目标进行定位。EL/L8300G 采用了短基线时差和旋转测向相结合的体制,探测频率范围为 0.5~18 GHz;另外,还有意大利 ELETTRONICASPA 公司研制的机动无源监视系统 (MAPS) 等。

美国基于“对敌防空压制”作战概念启动了“先进战术目标捕

获技术”(AT3)计划。该计划将测向交叉和时差定位技术应用到了飞机上,开发了“到达频率差”技术。该技术通过测量雷达信号的多普勒频移,并最终实现对雷达目标的精确定位<sup>[28]</sup>。另外,美国还研制了6个机载无源雷达<sup>[29]</sup>:无源测距系统(PRSS)、精确定位与识别系统(PLAID)、测向和定位系统(DFLS)、联合开发研究项目、LT 500 无源瞄准系统、战术雷达电子战斗系统。

国防科技大学孙仲康教授课题组从1994年就开始了无源定位与跟踪技术的研究;信息产业部电子第29所、中国航天工业总公司航天二院、西安电子科技大学等单位也对无源定位与跟踪进行了理论研究。电子科技集团51所采用相位差变化率进行定位方法,并在直升机上进行了半实物仿真实验,证明了这种定位方法的可行性;国防科技大学电子科技与工程学院和兵器工业部合作,采用目标的多普勒频率变化率的观测值进行了实物外场实验,并取得了成功。

## 2. 无源导航

无源导航是指通过被动接收已知位置的辐射源的辐射信号,采用无源定位的方法获得自身的位置,从而实现导航。由于无源导航和无源定位都是接收目标的辐射信息,使用相同的定位方法,所以将它们归为一类。各种卫星导航设备被动地接收卫星信号,通过多站信息的联立来实现自身定位,本质上也是一种无源定位方式。现在主要的卫星导航系统有美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、欧盟的GALIEO、中国的北斗系统等。

另外,也可利用已知位置的发射源,采用无源定位方法,获得自身位置,实现导航。如,文献[11]提出一种无源辅助导航方法。该方法以广播电台为辐射源,通过测得的相位差等信息实现无源导航。西安高科技研究中心和西北工业大学将无源定位技术应用到飞行器导航中,用以校正惯性导航,笔者也参与了该项目。

### 1.3 模糊单站无源定位有关问题

在许多应用场合下,人们不仅对目标辐射源的位置信息和目标的运动状态感兴趣,而且还需要对目标进行跟踪。实际上定位和跟踪往往是分不开的,因此称为“单站无源定位与跟踪”可能更合适。对目标进行定位跟踪的过程称为目标运动状态分析(Target Motion Analysis, TMA)<sup>[30]</sup>。

#### 1.3.1 模糊单站无源定位系统

单站无源定位是一个典型的非线性滤波问题,最常用的是卡尔曼(Kalman)滤波器。Kalman 滤波是建立在数据递推基础之上的,它以递推滤波器作为其基本结构形式<sup>[31]</sup>。但是在实践中,经常遇到非线性的状态方程和观测方程,此时 Kalman 滤波就不再有效,这时需要引入扩展 Kalman 滤波(Extended Kalman Filter, EKF)方法<sup>[32]</sup>,即将非线性观测量在预测点处进行泰勒展开后舍去高次项,线性化后代入 Kalman 滤波算法进行跟踪。但由于 EKF 估计方法具有依赖于初始状态估计、受测量噪声影响



大等缺点,估计过程中协方差矩阵易出现病态,导致滤波定位结果不稳定。为此,许多研究工作者致力于研究更加稳定、精度更高的算法,如迭代的扩展 Kalman 滤波(Iterated EKF, IEKF)方法<sup>[33]</sup>,它在没有更新测量值的情况下采用滤波值和协方差阵进行多次迭代计算,从而得到更高精度的估计。另外,针对无源定位中 EKF 方法的不足, Song 提出了另一种修正增益的扩展 Kalman 滤波(Modifiable Gain EKF, MGEKF)方法<sup>[34]</sup>,即如果观测方程的非线性函数是“可修正的(Modifiable)”,那么就可以用测量值计算 Kalman 增益的修正函数,从而对 Kalman 滤波的增益进行修正更新。随后 Galkowski 用更加简单的方法重新推导了只测角条件下的 MGEKF 滤波方程,用仿真验证了这种算法确实要比 EKF 方法优越<sup>[35]</sup>。后来 Guerci 又提出一种目标初始状态选定的方法以改进 EKF 或 MGEKF 的缺陷<sup>[36]</sup>。由于 MGEKF 方法需要寻找观测量的修正函数,因此当所用的观测量不满足可修正条件时, MGEKF 方法的稳定性和精确性达不到无源定位系统的要求。于是,一种修正协方差增益的 Kalman 滤波(Modified covariance EKF, MVEKF)算法,绕开了 MGEKF 方法中去寻找修正函数的问题,同时又保持了和 MGEKF 相近的性能,对于更一般的非线性滤波问题具有更广泛的实用性<sup>[37]</sup>。Julier and Uhlman<sup>[38]</sup>提出了一种新的改进算法——UKF(Unscented Kalman Filter)算法,该方法基于 UT 变换,通过选取一些 Sigma 样点,近似随机变量经过非线性变化后的均值和方