



Passive Location and Tracking

无源定位与跟踪

刘聪锋 编著

无源定位与跟踪

Passive Location and Tracking

刘聪锋 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了无源定位与跟踪的基本原理、实现方法和有关该技术的最新研究成果,比较充分地反映了当前无源定位与跟踪技术的最新研究状况。

全书共七章:绪论、高精度时延估计、振幅法和相位法测向、空间谱估计高精度测向、三角定位、二次定位、单站无源定位与跟踪。

本书可作为高等院校通信与电子工程专业及相关专业的高年级本科生和研究生的教材,也可供高等院校、科研院所、电子技术公司等有关部门的科研人员和工程技术人员作为自学或研究的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无源定位与跟踪/刘聪锋编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2011.6

ISBN 978-7-5606-2567-6

I. ①无… II. ①刘… III. ①无源定位 ②跟踪 IV. ①TN971 ②TP72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 055454 号

策 划 毛红兵

责任编辑 毛红兵 樊新玲

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2011年6月第1版 2011年6月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 21

字 数 488千字

印 数 1~2000册

定 价 39.00元

ISBN 978-7-5606-2567-6/TN·0600

XDUP 2859001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

本书由西安电子科技大学研究生教材建设基金资助

前 言

无源定位与跟踪(passive location and tracking),即利用被动传感器接收的威胁目标辐射信号或反射信号实现目标位置和运动状态的估计。在当今的信息战中,对威胁目标的位置和运动状态信息侦察得越精确,就越有助于对威胁目标实现精确的电子情报信息获取、电子对抗和精确打击,为最终摧毁目标提供强有力的支持和保障。

对目标的定位可以使用雷达、激光、声纳等有源设备进行,这一类技术通常称为有源定位,它具有全天候、高精度等优点。然而,有源定位系统的使用是靠发射大功率的信号来实现的,这样就很容易暴露自己,被对方发现,从而遭到对方电子干扰的软杀伤和反辐射导弹等硬杀伤武器的攻击,使定位精度受到很大的限制,甚至影响到系统自身的安全。对目标的定位,还可以利用目标的有意和无意辐射或反射信号来进行,这一类定位通常称为无源定位,即在不发射对目标照射的电磁波条件下,通过被动传感器测量目标辐射或反射的电磁波参数来确定威胁目标的位置信息和航迹。无源定位具有作用距离远、隐蔽性好等优点,对于提高系统在电子战环境下的生存能力具有重要作用。随着测量技术、信号截获和处理技术的发展,无源定位在电子战系统中占据着越来越重要的地位。

无源定位与跟踪技术,因其在战场上的重要应用,受到世界各国的重视,并且系统的复杂环境适应能力和目标定位与跟踪的精度、速度也在不断提高,它在现代军事电子系统中占有重要的位置。

本书比较系统地研究了当前无源定位与跟踪技术的基本原理、实现方法,以及有关该技术的最新研究成果,比较充分地反映了当前无源定位与跟踪技术的最新研究状况,而且具有较强的系统性。全书共七章,其主要内容可以概括如下:

第一章为绪论,简单介绍了无源定位技术的研究现状、观测量、可能体制以及误差表示方式等,其中比较详细地阐述了无源定位中的基本算法,以及定位与跟踪中的滤波算法。本章参考和引用了有关无源定位与跟踪、参数估计和滤波的文献资料,并进行了系统的研究和整理。

第二章为高精度时延估计,主要介绍高精度时延估计的基本理论与算法,其中详细讨论了最小熵时延估计算法、参数化时延估计算法、自适应时延估计算法、精确时延估计算法以及MVDR互谱时延估计算法等。本章参考和引用了有关时延估计的原始文献,并进行了系统的研究和整理。

第三章为振幅法和相位法测向。在振幅法测向中,主要介绍了波束搜索测向法、全向振幅脉冲测向法、多波束测向技术;在相位法测向中,主要介绍了数字相位干涉仪测向技术和线性相位多模圆阵测向技术,最后重点介绍了干涉仪测向中的相位解模糊方法,即长短基线解模糊方法和长基线解模糊方法。本章参考和引用了传统测向技术资料、其他有关干涉仪测向及其解模糊方法的文献资料,并进行了系统的研究和整理。

第四章为空间谱估计高精度测向,主要包括空间谱估计的基本概念、多重信号分类法

(MUSIC)、旋转不变技术估计信号参数法(ESPRIT)和最大似然估计法。在基本原理和概念部分,主要介绍了自适应波束形成的原理、信号子空间和噪声子空间的概念;在 MUSIC 类方法中,主要介绍了基本 MUSIC 算法、解相干 MUSIC 算法、Root-MUSIC 算法和西 Root-MUSIC 算法;在 ESPRIT 方法中,主要介绍了旋转不变子空间原理、基本 ESPRIT 算法、最小二乘 ESPRIT 算法、总体最小二乘 ESPRIT 算法和西 ESPRIT 算法;在极大似然估计方法中,主要介绍了极大似然估计算法的基本原理、交替投影算法和多项式方法。本章参考和引用了有关阵列信号处理的原始文献资料,并进行了系统的研究和整理。

第五章为三角定位,主要包括三角定位的基本概念、最小二乘误差估计、总体最小二乘估计、最小二乘距离误差估计算法、最小均方误差估计算法、广义方位角定位算法、最大似然定位算法、纯方位目标运动分析,以及三角定位中的误差分析等内容。其中不仅对各种基于最小二乘估计算法的三角定位方法进行了详细的介绍,而且进行了详细的性能分析。在最小均方误差估计算法中,不仅详细介绍了动态系统的模型和线性最小均方误差估计算法的基本原理,而且还介绍了基于线性模型的目标方位估计算法和卡尔曼滤波算法。在三角定位的误差分析中详细分析了几何精度因子、测向误差、纯方位定位中的偏差影响、背景噪声下基于 LOB 信息的融合定位以及航线误差的影响等。本章参考和引用了有关三角定位以及纯方位目标运动分析的原始文献资料,并进行了系统的研究和整理。

第六章为二次定位,主要包括 TDOA 定位技术和差分多普勒(DD)定位技术。在 TDOA 定位技术中,主要介绍了 TDOA 定位的基本概念、非线性最小二乘 TDOA 定位算法,根据相位数据估计 TDOA 算法,其中还讨论了 TDOA 的测量精度、噪声背景下的时差定位、时差定位的精度因子,以及测量偏差和运动对 TDOA 定位的影响等;在差分多普勒定位技术中,主要介绍了差分多普勒的概念、差分多普勒定位的精度、最大似然差分多普勒定位算法、互模糊函数和差分多普勒的估计方法,以及运动对差分多普勒定位的影响等;在距离差定位方法中,主要介绍了最小二乘距离差定位算法和基于可行二重向量的距离差定位方法;最后对无源定位系统的统计特性进行了详细的分析。本章参考和引用了有关二次定位的原始文献资料,并进行了系统的研究和整理。

第七章为单站无源定位与跟踪,主要包括飞越定位法,基于 DOA 和 TOA 测量的单站无源定位,基于相位差变化率、多普勒变化率的单站无源定位,以及基于电离层反射的单站无源定位。在飞越定位法中,主要介绍了飞越目标定位法和方位/俯仰定位法;在基于 DOA 和 TOA 测量的单站定位中,主要介绍了有关思路、数学模型以及相关定位跟踪算法;在基于相位差变化率的单站无源定位中,不仅详细介绍了定位原理,而且对定位误差和可观测性进行了详细的分析;在基于电离层反射的单站定位中,不仅介绍了电离层反射的定位原理,而且研究了地球曲率对定位精度的影响,以及相应 TDOA 计算方法和基于 MUSIC 倒谱的单站定位算法,最后讨论了电离层对定位结果的影响。本章参考和引用了有关单站无源定位与跟踪的原始文献资料,并进行了系统的研究和整理。

本书的题材比较新颖,内容具有较强的系统性,基本反映了近年来国内外关于无源定位与跟踪的最新、最重要的研究成果,全书注重学术性和实用性相结合,而且具有较强的可读性。作者希望本书能成为一部较为全面、实用的著作,并以此抛砖引玉,对国内高精度无源定位与跟踪技术的研究和发展起到一些促进作用。

在本书的编写过程中,得到了我的博士学位指导教师、西安电子科技大学雷达信号处

理国家重点实验室副主任、电子工程学院副院长廖桂生教授的支持和指导，廖老师自从我攻读博士学位开始就指导我开展有关自适应阵列信号处理和无源定位的关键技术研究，在此表示衷心的感谢。同时感谢我的博士后指导教师、西安电子科技大学智能感知与图像理解教育部重点实验室主任、电子工程学院院长焦李成教授的支持和指导。我的成长与进步都离不开廖老师和焦老师的指导和帮助。

我自2004年由西安卫星测控中心转业到西安电子科技大学工作以来，得到了西安电子科技大学电子对抗研究所所长赵国庆教授的指导和帮助，是赵老师指导我开展有关电子战及其信息处理方面的科研工作，而本书也是在赵老师的指导和帮助下完成的，在此对赵老师表示诚挚的谢意。同时感谢我的硕士学位指导教师、解放军电子工程学院陈鹏举教授，是他最早指引我开展无线电侦察方面的学习和研究工作，陈老师对我的教导和培养使我受益终生，在此表示深深的谢意。

感谢西安电子科技大学电子对抗研究所杨绍全教授、梁百川教授、李鹏教授、冯小平教授的帮助和指导，同时感谢西安电子科技大学电子对抗研究所其他老师提供的帮助和指导，在此对他们表示深深的谢意。感谢曾经培养和帮助过我的部队领导、老师和亲密战友。最后感谢我的爱人杨洁女士和可爱的女儿，是她们无私的爱、鼓励和帮助，才使我能够全身心投入到本书的撰写中。

本书的出版得到了西安电子科技大学研究生教材建设基金的立项和资助，在此表示感谢。

西安电子科技大学出版社的毛红兵编辑和各相关部门对本书的出版提供了很大的帮助和指导，在此也深表谢意。

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

作 者
2010年9月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国内外发展现状	2
1.3 无源定位系统的观测量	4
1.3.1 来波到达方向	4
1.3.2 来波到达时间	5
1.3.3 来波到达频率	6
1.3.4 来波到达幅度	8
1.4 无源定位系统的可能体制	8
1.4.1 双站测向交叉定位	9
1.4.2 三站时差二维双曲线定位	9
1.4.3 双站测向时差混合定位	11
1.5 无源定位中的基本算法	11
1.5.1 梯度下降法	11
1.5.2 线性均方估计	15
1.5.3 最小二乘估计	17
1.6 定位与跟踪中的滤波算法	18
1.6.1 动目标跟踪动态模型	18
1.6.2 卡尔曼滤波算法	19
1.6.3 α - β 与 α - β - γ 滤波算法	23
1.6.4 扩展卡尔曼滤波算法	26
1.6.5 不敏卡尔曼滤波算法	30
1.6.6 Bayes 滤波	32
1.6.7 粒子滤波	34
1.7 定位误差表示	38
参考文献	39
第二章 高精度时延估计	42
2.1 最小熵时延估计	42
2.1.1 信息熵	42
2.1.2 最小熵时延估计	43
2.1.3 语音信号的时延估计	45
2.1.4 仿真分析	46
2.2 参数化时延估计	47
2.2.1 广义互相关算法	47

2.2.2	参数化时延估计算法	48
2.2.3	仿真分析	52
2.3	自适应时延估计	54
2.3.1	最小二乘时延估计算法	54
2.3.2	自适应数字时延跟踪识别算法	58
2.4	精确时延估计	60
2.4.1	分数延迟滤波器	60
2.4.2	Lagrange 内插 FIR 滤波器	61
2.4.3	算法收敛性分析	64
2.4.4	仿真分析	66
2.5	MVDR 互谱时延估计	70
	参考文献	73
第三章 振幅法和相位法测向		77
3.1	振幅法测向	77
3.1.1	波束搜索法测向	77
3.1.2	全向振幅单脉冲测向	80
3.1.3	多波束测向技术	83
3.2	相位法测向	84
3.2.1	数字式相位干涉仪测向技术	84
3.2.2	线性相位多模圆阵测向技术	87
3.3	干涉仪测向解模糊算法	89
3.3.1	长短基线解模糊方法	89
3.3.2	长基线解模糊方法	91
	参考文献	95
第四章 空间谱估计高精度测向		96
4.1	自适应波束形成器	96
4.2	信号子空间与噪声子空间	101
4.3	多重信号分类	103
4.3.1	基本 MUSIC 算法	103
4.3.2	解相干 MUSIC 算法	105
4.3.3	求根 MUSIC 算法	107
4.3.4	酉 Root-MUSIC 算法	109
4.4	旋转不变技术	113
4.4.1	基本 ESPRIT 算法	113
4.4.2	ESPRIT 算法的另一种形式	116
4.4.3	酉 ESPRIT 算法	121
4.5	极大似然估计算法	129
4.5.1	极大似然估计检测器	129
4.5.2	交替投影算法	131

4.5.3 多项式法	133
参考文献	135
第五章 三角定位	139
5.1 基本概念	139
5.2 最小二乘误差估计	142
5.3 总体最小二乘估计	146
5.4 最小二乘距离误差定位算法	148
5.4.1 布朗最小二乘三角定位算法	148
5.4.2 半球最小二乘误差估计定位算法	151
5.4.3 Pages-Zamora 最小二乘定位算法	154
5.4.4 总体最小二乘定位算法	156
5.5 最小均方误差估计	157
5.5.1 动态系统	157
5.5.2 线性最小均方误差估计	159
5.5.3 基于线性模型的目标方位估计	162
5.5.4 卡尔曼滤波法	163
5.6 广义方位角法	171
5.6.1 问题描述	171
5.6.2 梯度和协方差矩阵结构	173
5.6.3 迭代过程的开始和结束以及估计误差特性	174
5.7 最大似然定位算法	175
5.7.1 基于最大似然估计的三角测量算法	177
5.7.2 最大似然算法的比较	179
5.7.3 Stansfield 定位估计的偏差和方差	182
5.8 纯方位目标运动分析	183
5.8.1 目标运动分析	183
5.8.2 目标状态与参数估计方法	189
5.9 三角定位中的误差分析	195
5.9.1 三角定位的几何精度因子	195
5.9.2 测向误差	196
5.9.3 纯方位定位中偏差的影响	196
5.9.4 噪声背景下基于 LOB 信息的融合定位	198
5.9.5 航线误差的影响	200
参考文献	203
第六章 二次定位	207
6.1 TDOA 定位技术	207
6.1.1 TDOA	207
6.1.2 基于 TDOA 的定位	209
6.1.3 非线性最小二乘	213

6.1.4	根据相位数据估计 TDOA	214
6.1.5	TDOA 的测量精度	217
6.1.6	噪声背景下的时差定位	223
6.1.7	时差定位的精度因子	226
6.1.8	测量偏差对 TDOA 定位的影响	228
6.1.9	运动对 TDOA 位置估计的影响	230
6.2	差分多普勒定位	233
6.2.1	差分多普勒	233
6.2.2	差分多普勒定位的精度	236
6.2.3	最大似然差分多普勒定位算法	237
6.2.4	互模糊函数	241
6.2.5	噪声背景下利用相位数据估计正弦信号的差分多普勒	241
6.2.6	运动对差分多普勒位置估计的影响	244
6.3	距离差定位方法	247
6.3.1	最小二乘距离差法	247
6.3.2	基于可行二重向量的距离差定位法	253
6.4	无源定位系统的统计特性分析	260
6.4.1	估计方法	261
6.4.2	估计精度	264
6.4.3	二维估计	267
6.4.4	双曲线定位系统	270
6.4.5	测向定位系统	277
6.4.6	其他定位方法	284
参考文献	285

第七章	单站无源定位与跟踪	289
7.1	飞越目标定位法	289
7.1.1	飞越目标定位法	289
7.1.2	方位/俯仰定位法	290
7.2	基于 DOA 和 TOA 测量的单站无源测距定位技术	291
7.2.1	实现单站无源定位的一种思路	291
7.2.2	利用 DOA 及 TOA 测量定位的数学推导	294
7.2.3	定位跟踪算法	297
7.3	基于相位差变化率的单站无源定位	303
7.3.1	定位原理	303
7.3.2	定位误差分析	306
7.3.3	EKF 定位算法	307
7.3.4	可观测性分析	307
7.4	基于多普勒变化率的单站无源定位	309
7.5	基于电离层反射的单站无源定位	312
7.5.1	电离层反射无源单站定位技术	313

7.5.2 地球曲率的影响	315
7.5.3 采用倒谱计算 TDOA	315
7.5.4 基于 MUSIC 倒谱的单站定位	317
7.5.5 电离层对定位结果的影响	319
参考文献	320

第一章 绪 论

1.1 概 述

在电子对抗领域,对辐射源位置信息侦察得越精确,就越有助于对辐射源进行有效的战场情报信息获取、电子干扰以及精确的打击,为最终摧毁目标提供有力的保障。因此,对辐射源的无源定位技术在电子对抗领域占有很重要的地位。对目标的定位可以使用雷达、激光、声纳等有源设备进行,这一类技术通常称为有源定位,它具有全天候、高精度等优点。然而,有源定位系统的使用是靠发射大功率的信号来实现的,这样就很容易暴露自己,被对方发现,从而遭到对方电子干扰的软杀伤和反辐射导弹等硬杀伤武器的攻击,严重影响定位精度,甚至影响到系统自身的安全。

利用多个已知辐射源的信号可以对目标定位,这通常是指目标对自身的定位,其典型应用就是 GPS 全球卫星定位系统。GPS 具有全天候、高精度、隐蔽性强等优点,但是由于辐射源信号形式已知,接收机极容易受到电子干扰而导致定位性能降低,并且目前我国并不掌握 GPS 的主动权,因此对其使用的效果就会大打折扣。对目标的定位也可以利用第三方的辐射源信号来实现。这种方法是指通过已知参数、位置的第三方辐射信号和经过目标反射信号的相关接收与处理,对目标进行定位,因此它对于隐身目标和寂静目标具有较强的定位能力。

对目标的定位,还可以利用目标上的无意辐射和有意辐射来进行,这一类定位通常称为无源定位。在不发射对目标照射的电磁波条件下,通过测量雷达、通信等发射机(辐射源)的电磁波参数来确定辐射源及其携带平台或目标的位置信息和航迹。无源定位具有作用距离远、隐蔽性好等优点,对于提高系统在电子战环境下的生存能力具有重要作用。随着测量技术、信号截获和处理技术的发展,无源定位技术在电子战系统中占据着越来越重要的地位。

无源定位技术,在电子对抗领域早已有之。由电子侦察系统发展起来的多站测向交叉定位、多站时差定位,直至多站时差测向混合定位等技术,国外不仅在理论原理、技术上都已发展成熟,在近期还实际生产出相应的无源探测定位系统(或称无源雷达)予以实战使用。

近二十年来,多站无源定位技术和系统的研究,在国内已取得了很大的进展。多站体制的无源定位技术适合在陆基使用,而在空基、海基条件下使用,将增加由载体运动及载体姿态变化引入的技术难度。在陆基使用中,由于多站几何配置影响到定位精度,这就给

多站选址及系统装备机动带来了困难。单站无源定位可以克服多站定位的诸多缺点,使得战术应用更加机动,降低了多站定位系统中因几何配置引入的技术难度,更适合于陆基、空基和海基场景。传统的单站无源定位一般采用多次测向交叉法或只测向(或称为仅方位、唯方位)定位方法,但是这种方法由于需要长时间多次测量信号的来波方向,而且对于运动目标定位需要观测器自身按照某种形式机动(如要求飞机、舰船按“Z”形运动),故具有收敛速度慢、容易发散等缺点,在实战环境下难以使用。

1.2 国内外发展现状

早在 20 世纪 40 年代电子对抗活动开始的初期,人们就开始用简单的测向设备,围绕被定位的辐射源进行多次测向,然后用人工工作图的方式确定该目标的位置。以后人们就专门为一些电子侦察设备配置对应的地图,把侦察的结果(主要还是方位)标绘在地图上,通过交汇,确定目标的位置。随着技术的发展,人们逐渐把无源定位作为一项专门的技术提出来,并采用计算机计算定位,无源定位不再是侦察设备的一项附带功能。在专用的机载和地面固定的侦察定位站出现后,人们又开始研究如何提高定位精度和对运动目标进行快速定位。位置的精度从大约为定位站到目标距离的几分之一迅速地向百分之一的量级前进。近十年来,除了进一步研究提高定位精度和缩短定位时间以外,在工程上,对多目标的同时定位和对非主动发射源的定位正处于一个技术走向成熟、研究走向深入、设备走向实用的阶段。

我国的无源定位技术发展较晚,在 20 世纪 80 年代初才开始这方面的理论研究,采用的方法主要是方位测量三角交汇定位,近年来,开始出现研究时差定位和多普勒频差定位技术,还出现利用相位变化率的定位技术,但主要还是采用测向定位和时差定位技术。

对辐射源目标的无源定位分为单站定位和分布式多站定位。单站定位利用一个平台上的单个或多个接收机在不同时刻对信号进行测量和处理。它主要利用单站的机动性和灵活性,不需要大量的数据通信。如果装载在无人飞机上飞临目标,则可以用简单系统和低测量精度在小范围内得到高的绝对定位精度。通常,单站定位要求侦察站在一段时间内有较大的移动,以获得较好的定位效果。因此,单站定位需要较长的时间。分布式多站定位,由空间上分布配置的接收机同时对辐射源信号进行接收处理,确定多个定位曲面(如平面、双曲面、圆等),多个曲面相交,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的特点来定位和提高定位精度,具有速度快、精度高的优点,但多站系统是靠各侦察站之间的协调工作,进行大量数据传输来完成的,系统相对较复杂,且当系统侦察站需要机动时,复杂度更高。

在定位方法中,方向测量定位是研究最早、最多,应用也最广泛的定位方法,因为方向测量是电子侦察设备的基本功能之一,并且方向参数也是辐射源最可靠的参数之一,特别是在现代复杂信号环境下,方向参数几乎成了唯一可靠的参数。因此,方向测量法一直是定位方法研究的主要内容,在定位原理、定位算法、定位精度分析、最佳布站分析、跟踪滤波和虚假定位消除等方面做了大量工作,并取得了一定的成果,但是还有待于进一步的研究和改进。

无源定位中的时差定位是“反罗兰”定位系统,具有高度的隐蔽性、广泛的实用性和精确的目标识别特性。随着多平台通信技术的发展和时差测量技术的进步,时差定位已经成为现代无源定位技术中最具有发展前景的定位方法。辐射源到达两个侦察接收机的时间差构成一个双曲面(线),多个双曲面(线)相交即可得到目标的位置。在这种定位方法中,时间差的测量精度和侦察接收机自定位的精度是影响辐射源定位精度的关键因素。时间差测量的方法比较多,有最大似然估计、最小二乘估计、最小加权均方估计,以及一些直接估计的方法。对于脉冲信号、连续波信号以及干扰的时间差测量已经取得了一些成就,但是还有很多工作要做,如定位方法和性能分析、脉冲信号配对、扩谱信号相关处理、宽带干扰处理等。

对无源时差定位技术的研究在 20 世纪 60 年代就已经开始了,并在各个方面取得了令人瞩目的成就。由于测时精度的关系,现有的无源时差定位要达到 1% 的相对定位精度,一般都采用基线距离长达数十千米的长基线系统。已知捷克的“塔玛拉(TAMARA)”系统属于按时差定位法实现的系统,新一代的“维拉(VERA)”系统是上述系统的进一步发展。以上系统都属于电子战系统,用来检测和识别机载、地面和海面电磁脉冲辐射源,确定其坐标并对目标进行跟踪。“塔玛拉”系统为二维系统,由 3 个天线系统、3 个接收站、计算系统、信息控制和显示系统组成。要保证辐射源位置定位精度小于距离 1%,主站和副站之间的基线长应为 15~50 km,通过无线电中继站进行副站到主站的信息传输。新一代“维拉”系统可能综合二维和三维方案,首先每一种方案都有两种设计方式:“维拉-A”和“维拉-E”。二维方案的“维拉”系统由 1 个主站、2 个副站和信息处理站组成,站间通信无线电中继线路为接收站集成部件。“维拉”系统适用于时短信号,其作用距离可达 450 km,相对于中心站的方位视场为 120°。当主站在两副站之间,且距离两副站距离相等时,将侦察站放在一条直线上是“维拉”二维系统的理想结构。为了保证对脉冲辐射源信号定位所需的精度,站间基线长为 50~70 km。三维方案的系统与二维系统不同之处在于增加了一个接收站,当主站位于等边三角形中心(它由 3 个副站形成,分别与中心站相隔 25~30 km)时,“三波束星形”为三维系统的理想结构。这种配置的系统能保证对 360°范围内的脉冲辐射源进行检测和定位,作用距离可达 300 km。

目前无源定位的方法主要包括:

(1) 测向交叉定位:通过机载或地面单站的移动,在不同位置多次测量同一辐射源的方向,再利用多次测量方向的交叉点实现定位;或者通过空载或地面固定多站的测角系统所测得的指向线的交点来实现定位。

(2) 时差定位:利用三个或者多个侦察站,测量出同一信号到达各侦察站的时间差进行定位。

(3) 测向测时差混合定位:通过两个或多个侦察站采集到的辐射源信号到达时间差以及辐射源信号入射线的方位角来进行定位。

(4) 时差频差定位:针对观测站与辐射源之间具有的相对运动场景,通过测量观测站接收信号之间的时差和频差进行辐射源定位。

辐射源无源定位技术,因其在战场上的重要应用,受到世界各国的重视,并且系统的复杂环境适应能力和辐射源定位的精度、速度也在不断提高,它在现代军事电子系统中占有重要的位置。我国也将无源定位技术的研究和使用作为电子战领域的一项关键技术。而

在目前的无源定位技术当中,无源时差定位系统因具有定位精度高、组网工作能力强、抗打击能力强等众多优点而成为最受关注的研究技术。当观测站和辐射源具有相对运动时,时差、频差高精度定位技术是近几年研究的重点。

1.3 无源定位系统的观测量

无源定位系统是在目标辐射源有来波信号的条件,获得含有目标空间位置、运动状态、性质特征等信息的有关观测量。无源定位系统可获得的观测量主要有来波到达方向、来波到达时间、来波到达频率以及来波到达幅度等^[1-3]。

1.3.1 来波到达方向

对于来波到达方向(Direction of Arrive, DOA),几乎所有的目标空间位置的测量手段,都以测量设备所处位置为原点,在直角坐标系或球面坐标系中表示目标的空间位置。来波到达方向的表示如图 1.3-1 所示。

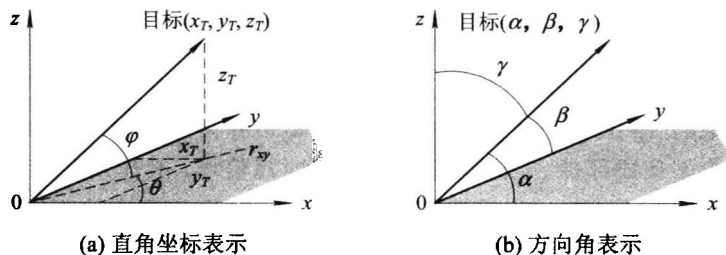


图 1.3-1 来波到达方向的表示

在直角坐标系中,目标的位置可以利用矢量 \mathbf{x}_T 在 x 、 y 、 z 轴上的投影 x_T 、 y_T 、 z_T 来表示,即

$$\mathbf{x}_T = [x_T, y_T, z_T]^T \quad (1.3-1)$$

测量设备大都不能直接获得 x_T 、 y_T 、 z_T , 而是通过获得两自由度转台在水平面 $x-y$ 上的方位角 θ , 以及垂直面 $r_{xy}-z$ 上的俯仰角 φ 来求解和表述的, 这里 r_{xy} 为原点到目标的向量在 $x-y$ 平面上的投影。从图中的几何关系可得方位角 θ 及俯仰角 φ 与 x_T 、 y_T 、 z_T 之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} \tan\theta &= \frac{x_T}{y_T} \Leftrightarrow \theta = \arctan \frac{x_T}{y_T} \\ \tan\varphi &= \frac{z_T}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2}} \Leftrightarrow \varphi = \arctan \frac{z_T}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2}} \end{aligned} \right\} \quad (1.3-2)$$

由式(1.3-2)可以看出,利用方位角 θ 构成的定位平面与俯仰角 φ 构成的定位锥面相交,可以获得目标径向矢量 \mathbf{x}_T 的方向射线。

径向矢量也可以利用方向角 α 、 β 、 γ 来表示,即

$$\mathbf{x}_T = r_0 \cdot [\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma]^T = [r_0 \cos\alpha, r_0 \cos\beta, r_0 \cos\gamma]^T \quad (1.3-3)$$

因此,径向矢量 \mathbf{x}_T 可以利用它的幅值 $r_0 = |\mathbf{x}_T|$ 乘以它的单位径向矢量 $[\cos\alpha, \cos\beta,$

$\cos\gamma]^T$ 来表示,前者表示目标径向距离值,后者表示目标径向射线方向。其中 $\cos\alpha$ 、 $\cos\beta$ 、 $\cos\gamma$ 分别表示单位径向矢量在 x 、 y 、 z 轴上的投影分量,方向角 α 、 β 、 γ 的余弦 $\cos\alpha$ 、 $\cos\beta$ 、 $\cos\gamma$ 通常称为方向余弦,单位径向矢量的幅值与方向余弦的关系为

$$r_0 = |\mathbf{x}_T| = \cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1 \quad (1.3-4)$$

从式(1.3-4)可以看出,上述三个参数只有两个是自由的,即如果其中任意两个参数确定,可以根据式(1.3-4)确定第三个参数。

目标辐射信号的来波到达方向,一般根据无源探测设备测量的方向参数来表示,因此可以有多种表达方式。若无源探测设备与目标之间有相对运动时,这些方向参数都可以用时间函数来表达。

1.3.2 来波到达时间

目标辐射源在 T_0 时刻发射一个信号,而在径向距离为 $r_0 = |\mathbf{x}_T|$ 的无源探测设备(或称之为观测器)处可以得到一个来波信号,如图 1.3-2 所示。

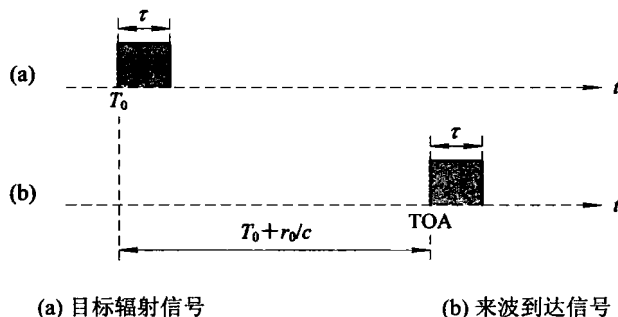


图 1.3-2 无源观测站接收的来波时序图

这里假设目标信号的发射瞬间为 T_0 ,而观测器接收到这个来波信号的时刻即为来波到达时间(Time of Arrive, TOA),且有

$$\text{TOA} = T_0 + \frac{r_0}{c} = T_0 + \tau_{d_0} \quad (1.3-5)$$

式中, c 为电磁波传播速度, $\tau_{d_0} = r_0/c$ 为发射信号到达距离为 r_0 的观测站处的时间延迟。

TOA 中含有目标与观测器之间的距离信息,但对于非合作目标场景,由于无源观测器无法获得目标信号发射瞬间的时间 T_0 ,也就无法从测得的 TOA 中减去 T_0 而获得距离 r_0 的数值。

假设目标辐射一串等重复周期 T_r 的脉冲信号,图 1.3-3 给出了目标与观测器(Target-Observer, T-O)之间距离固定不变,及目标与观测器之间有相对运动而使距离不断变化的情况下,目标发射信号及观测器接收来波之间的时间关系。

这时,观测器接收到的来波序列到达时间 TOA_i (用下标 i 表示信号序列的到达次序)为

$$\text{TOA}_i = T_0 + iT_r + \frac{r_i}{c} = T_0 + iT_r + \tau_{d_i} \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (1.3-6)$$

式中: T_0 为起始发射信号的时刻; T_r 为重复周期; r_i 为第 i 个脉冲信号发射时 T-O 之间的距离间隔; τ_{d_i} 为相应的传播时延。