

# 无源定位

胡来招 著

# Passive Locating

国防工业出版社

# 无源定位

## Passive Locating

胡来招 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

无源定位 / 胡来招著. —北京: 国防工业出版社,  
2004. 1

ISBN 7-118-03159-3

I 无、 II 胡、 III 无源定位 IV TN971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 040922 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{1}{2}$  197 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 23.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

**电子对抗  
应该有理论  
在创新中前进**

# 国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾 问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镛

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

## 前 言

雷达(RADAR)是无线电探测和定位这一英语字缩写后的音译。自雷达诞生以来,其技术有了长足的发展,它所能探测的目标的距离可以远至数千千米以外,等效反射面积可以小于 $10^{-2}\text{m}^2$ ,它对距离的测量精度可以优于1m。近期发展的雷达成像技术,对目标的分辨率已经做到只有几英寸。雷达探测目标所耗费的时间,也多在秒以下的数量级上。所有这些技术指标,都还在不断地提高。当利用电磁信号获取目标的位置信息时,总是首先想到雷达。雷达探测目标,有一点是共同的,那就是要先发射一个电磁信号,雷达实际探测的是目标对这个信号的反射回波。当人们用仿生学来研究时,雷达对目标定位就如同蝙蝠对目标的探测一样。大部分生物用眼睛对周围环境的目标定位,利用的是目标对外界的辐射,眼睛本身没有辐射信号。从这个意义上讲,利用电磁波对目标进行定位,也应该是可以不必故意发射信号的。这就是我们最早对无源定位的理解。

实际上,如果仅从定位站本身没有辐射电磁波这一点来定义无源定位,那它可能包括的范围太广了。它可以是对外界目标的定位,也可以是对定位站自身的定位。可以说,所有的导航系统,包括现在具有广泛应用的全球定位系统,就是这后一种定位系统。在本书范围内,我们并不研究这一类的无源定位。对非定位站的目标的定位,按其机理的重大差异,至少可以分成三大类。第一类是目标发射信号,而且是被系统设计好的信号,也就是说,目标是定位的配合者,不妨把它叫做对配合目标的跟踪。显然,信号的设计和接收,有时还包括定时,在这一类中具有特别的意义,是它区别于其它类的主要点。第二类是目标发射非配合的信号,比如说,

目标本身是一个雷达,它在工作时不停地发射信号,或者说,目标是一部电台,它在工作时也主动地发射信号,但是,它们都不是为了定位站而发射信号的。本书主要研究的是进行这一类定位的系统。第三类是目标并不有意地发射信号,只是无意地反射了其它辐射源照射到它的信号。由于信号反正不是定位站发射的,也不是配合的,这一类定位在原则上与第二类是相仿的。但是,与第二类相比,由于目标仅仅是反射信号,侦察定位站可能接收的信号强度将小得多。在这样的特定条件下,怎样接收信号并进行正常的定位,是其重要的特点,本书也将进行探讨。

除去导航和跟踪,无源定位首先应用在电子对抗领域内,通过侦察接收机,截获雷达或通信等辐射源发出的电磁信号,用来确定这些辐射源及其平台的位置。电子对抗是敌对双方充分利用与电磁波有关的活动争取战争胜利的对抗行动。随着电子技术的迅速发展,电子对抗在战争中的作用日益加强,最近十几年发生的局部战争,已经充分地说明了电子对抗在现代战争中具有特殊的重要意义。可以肯定地说,在现代战争中电子对抗实力强的一方,总是占有主动权的一方。正是由于电子对抗在现代战争中的重要性,电子对抗技术作为一门新兴学科正在迅速成长。在电子对抗技术发展的初期,主要力量放在简单的侦察设备和干扰设备单机的开发、制造,并很快进行生产和装备。作为一个系统,无源定位在初期还没有来得及提到议事日程上来。然而,随着技术的进步,大量的无源定位活动已经开展,各种研究需要总结。人们通过电子侦察获取对方电磁辐射源的大量技术参数,而位置信息本来就是最重要的信息之一。在初期,人们仅仅使用单机侦察目标辐射源的方位,把多个单机在大致相同的时间上,或者一个单机在运动过程中的不同时间上,所获取的同一个目标的方位,绘制在同一张地图上,通过交叉,就得到了目标的位置。这样原始的技术显然需要升华。另外,作为对目标定位最有力的武器的雷达,也面临着越来越有威胁的对抗,这主要包括各种干扰和反辐射导弹的攻击。雷达只要工作,就需要发射信号,就可能受到威胁。无源定位无疑是雷

达的一个极好的补充,由于它不发射信号,就不容易受到干扰和攻击,甚至没有使敌对方察觉定位系统正在工作。所以,无源定位已经成为电子对抗最重要的技术之一,呈现在人们面前。

同时,在电子对抗的侦察过程中,信号的分选始终是接收技术中的一大难题。在过去的历史中,随着信号处理技术的发展,虽然对多信号分选的能力似乎在提高,但是,由于雷达信号本身的复杂性和信号环境的密度提高得更快,使得信号分选的实际效果变得越来越差。信号的分选在一定程度上依赖于信号的某种不变性,在信号越来越复杂的条件下,差不多信号的所有参数都是可变化的,甚至是捷变和伪随机变化的,使我们几乎失去了分选的依据。幸运的是,目标的位置是稳定的,它不能发生突跳性的变化,即使对于以2倍声速运动的目标,在10ms量级的时间内,这个变化也仅仅只有7m,相对于目前无源定位所能达到的精度来说,仍然是可以忽略的,也就是说,可以认为目标在这么短的时间内,位置依然是固定的。这样,目标的坐标实际上将成为分选信号最可靠的依据。一个完整的电子对抗侦察系统,如果对无源定位不作任何考虑,不能不说是重大缺陷的。

从上面的简单陈述可以看出,无源定位已经成为电子对抗的一个相当重要、不可或缺的技术。在总结电子对抗技术时,人们会自问,我们首先该总结什么。当我们什么也没有时,由于顾不及或许还不会首先研究、总结无源定位方面的技术;但是,现在越来越多的人已经了解电子对抗技术,总结、宣传无源定位已经刻不容缓。对于无源定位,尽管需要已经呈现在人们面前,但是,神秘感仍然笼罩着人们。当从仿生的角度看,从概念上认为无源定位是可以实现的,但是将概念变成现实总感到困难重重。正是基于这样的考虑,作者尽己所能,力图在本书中清楚阐述无源定位的基本技术要点,同时提出最新的技术观点,使无源定位这门新兴技术,变得非常普及,又非常可用。

单个侦察接收机对目标一般是没有距离信息可以输出的,所以无源定位在大多数情况下都需要多个侦察站,并从几何求解开



始。然而,非线性的算法和对误差处理的不方便激励人们从另外一个角度来研究定位的计算。本书明确地提出基于概率的定位算法,把定位的概念定义为从已知的测量中求取在概率意义上讲最可能的一个空间坐标。当目标运动时,有各种各样的对离散定位结果的平滑和滤波处理,本书特别阐述了这种新的平滑考虑,利用了运动目标运动特性对定位平滑的限制。这部分内容是本书的第2章。定位常用的测量基础是对信号方位和时差的测量,作者将它们纳入本书的第3章和第4章。具有特色的是作者更强调对方位信息和时差信息的提取,也就是说,本来在接收到的信号中已经含有我们需要的信息,我们应该探讨多种可能的算法,使可能得到的测量结果误差尽量地小,尽可能地少受硬件性能的影响。同时,当我们面对多个目标时,应当利用目标的位置对信息进行预处理,借以减少必须处理的信息量,使定位算法具有良好的实时性。由于它们是信息提取的一部分,因此也把它们放在这两章中。定位是一个系统,我们特别感兴趣的是定位误差,而这又自然与定位站的位置配置紧密相关,所以本书的第5章专门分析了定位误差,并论述了怎样配置好侦察定位站的问题,作者明确提出的观点是定位误差准则、信号截获准则和协同准则。不论怎样定位,对信号的截获可以说是最基本的,特别对于前面所讲的第三类无源定位,微弱信号的接收十分关键。也不论采用什么体制定位,定位结果的显示不但是定位不可少的一部分,而且会深刻地影响定位的性能,所有这些基础的问题,作者都把它和对定位的一般论述放在一起,构成本书的第一章。通过对本书编排和特色的论述,读者也可以清楚,本书并不一定需要顺序阅读。读者在实践中首先面临什么问题,或者对哪一方面问题感兴趣,就可以先阅读与那一方面有关的章节。

在此之前,本人已经出版了3本电子对抗领域的专门论著,它们分别是《测向定位文集》、《雷达侦察接收机设计》和《瞬时测频》。但是,能够潜心总结,写成本书,需要环境的压力和实际的需求。从这个角度出发,作者特别感谢中国电子科技集团公司第二十九

研究所(以下简称二十九所)所营造的环境。没有二十九所广大科研人员多年的实践,就没有再写本书的需求和推动力;没有二十九所群体的奋斗精神,也就不足以鼓励我完成本部著作。作为回报,本人衷心地希望本书能够对研究无源定位的同行有所帮助,书中所陈述的理论能够促成国内有水平的无源定位设备的成功开发。同时,也希望这样的著作对营造一个更加催人奋进的环境有所推动。

胡来招

2002年11月

# 目 录

<b>第 1 章 定位基础</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 定位与坐标 .....	7
1.3 信号截获.....	13
1.4 定位结果的指示.....	25
<b>第 2 章 基于概率的定位</b> .....	31
2.1 无源定位原理.....	31
2.2 概率定位算法.....	41
2.3 动目标定位的平滑.....	60
2.4 定位结果的融合.....	70
<b>第 3 章 方向的测量</b> .....	80
3.1 测向原理.....	80
3.2 nABD 测向法 .....	95
3.3 模式匹配测向法 .....	107
3.4 方向谱估计测向 .....	113
3.5 时间换通道的测向法 .....	121
3.6 测向误差分析 .....	129
3.7 平衡和校正 .....	136
3.8 方位选通和跟踪 .....	147
<b>第 4 章 时差测量</b> .....	150
4.1 测时差原理 .....	150
4.2 测时差的相关算法 .....	165
4.3 副载波测时差法 .....	183
4.4 测时差误差分析 .....	190

4.5 时差选通和跟踪 .....	199
<b>第 5 章 定位误差与定位站的配置</b> .....	<b>204</b>
5.1 定位误差的一般分析 .....	204
5.2 动态定位及其定位误差 .....	210
5.3 定位站配置的误差准则 .....	216
5.4 定位站配置的信号截获准则 .....	225
5.5 定位站配置的协同准则 .....	230

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>Basis on locating</b>	1
1.1	Introduction	1
1.2	Locating and coordinates	7
1.3	Signal interception	13
1.4	Indication for locating	25
<b>Chapter 2</b>	<b>Locating based on probability</b>	31
2.1	Principle on passive locating	31
2.2	Algorithm for locating through probability	41
2.3	Location smoothing for moving target	60
2.4	Fusion on locating results	70
<b>Chapter 3</b>	<b>Direction finding</b>	80
3.1	Principle on direction finding	80
3.2	DF with nABD	95
3.3	DF through model matching	107
3.4	DF through direction spectrum estimation	113
3.5	DF with time for channel method	121
3.6	DF error analysis	129
3.7	Balance and calibration	136
3.8	Window and tracking on direction	147
<b>Chapter 4</b>	<b>Measurement on time difference</b>	150
4.1	Principle on time difference measurement	150
4.2	Correlation algorithm for time difference	165
4.3	Using second carrier for time difference	183
4.4	Time difference error analysis	190

4.5	Window and tracking on time difference	199
<b>Chapter 5</b>	<b>Error on locating and station deployment</b>	<b>204</b>
5.1	General analysis on locating error	204
5.2	Dynamic locating and its error	210
5.3	Error principle for station deployment	216
5.4	Interception principle for station deployment	225
5.5	Cooperating principle for station deployment	230

# 第1章 定位基础

## 1.1 概 述

物理世界在具体的时间和空间中存在,我们研究世界,自然离不开时间和空间。除了像电磁场这样无形的物质以外,物体总是占有一定的空间,在物理空间上处于某个位置。当我们面对周围的环境时,总是对这个环境中形形色色的物体的位置特别感兴趣。我们的感官让我们能够感摸到、看到很多物体的位置。超出这个范围,我们依靠技巧和设备,努力追求获取我们所感兴趣的目标的坐标位置,并且在很多场合下,力图使我们能够得到的位置精度尽可能高。随着电子技术的发展,人们找到了一些方法,实现了很多开始只是在神话和科幻中出现的结果。大到整个宇宙,人们确定以光年为距离单位的星体的位置;小到一个原子,人们确定存在时间远不到一个毫秒的微粒的运动轨迹。技术的力量使人类自己都感到兴奋和奇怪。

在电子对抗领域内,对方目标的位置信息十分重要,人们钟情于使用本领域的技术,在不发射对目标照射的电磁波的条件下获取目标的位置,我们称之为无源定位。也许,这样的说法是十分模糊的。无源的含义绝对不是不需要能源,或者不用电源。当我们超出设备所占空间的范围内使用电磁波时,不外乎发射或接收电磁信号。本书的所谓无源,仅仅专指定位站不向被定位的对象发射电磁信号。与之对应,我们把定位站发射信号的定位称为有源定位,当然有源定位实际上还有别的更科学和更习惯的名称。定位的对象又是什么?在本书中,我们首先限定定位的对象不是定

位站自身,后者实际上也是一个很大的专业范围,同样有其更合适的名称。再想象一下我们的眼睛透过非常干净的玻璃看玻璃外面的东西,我们看不见玻璃,看到的是外面的物体。对于与电磁波关联的目标,情况是相同的。对于电磁波透明的物体,我们用电磁的方法是探测不到的,当然也就不能定位。对于与环境电磁特性完全相同的物体,用电磁的方法也无法把它与背景区分开来。对于它们,当然也就不能通过电磁的手段进行定位。所以,定位的对象也不是这个意义上的物体。本书所研究的定位的对象主要是指电磁信号的辐射源。当目标对电磁信号的反射较它所处的环境有明显差别时,反射与自己辐射原则上并无大的差别,我们也把在这种环境下的物体看成是定位的对象。确切地说,本书所研究的无源定位的对象还不是这样意义上的一切对象,我们仅仅探讨主要用于电子对抗领域的无源定位。所以,还增加一个限定,那就是被定位的对象并不和定位站配合。配合与不配合的差别只有一点,那就是定位站所接收的信号的特性。当目标不配合时,信号特性是定位站事先不知道的,定位站不知道信号在什么时候准确地发射。信号的波形和时间不但影响定位的接收机,而且将明显地影响定位的体制和精度,造成对配合信号的定位和对非配合信号的定位在原理上有大的差别。如果没有特别的声明,本书所说的无源定位都是指我们在这里限定的非常狭义的无源定位。

正是由于无源定位的意义,早在电子对抗活动开始的初期——20世纪40年代,人们就开始用简单的测向设备,环绕希望被定位的目标多次测向,然后用人工做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,人们逐渐地把无源定位作为一项专门技术提出,并采用计算机计算定位,无源定位不再是侦察设备的一个附带的功能。在专用的机载和地面固定的侦察定位站出现后,人们又开始向提高定位精度和对运动目标快速定位进军。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 10 年来,除了进一步研究提高定位精度和缩短定位时间以外,在工程应用上,对多目标的同时定位和对非主动发射源的定位也已经取得了实质性的进展。可以说,无源定位现在正处在一个技术走向成熟、研究走向深入、设备走向实用的阶段。

在深入研究无源定位之前,先了解一下它有哪些特点。无源定位的所有特点都来源于它在定位的过程中不向被定位的目标发射电磁信号。所以它的第一个特点就是无源,即直接定位的一方不发射照射目标的信号。这一点同一般侦察设备是相同的,由于这一特点,无源定位系统的使用是不易被对方感知的,一般不存在被干扰的问题。但由于不发射电磁信号,而一定要求目标发射信号,或者反射信号。不满足这样的条件,本书所论述的无源定位系统是不能定位的。

无源定位的第二个特点是一般需要多站协同工作。由于单个侦察站在接收电磁信号时无法计量信号来自多远,它只能给出在什么时间收到什么方位进入的信号。这样,除了一些特殊的情况外,无源定位需要多站提供信息,协同定位。这种协同表现为或者定位站需要在空间移动、多次测量,或者表现在多站间要有信息通信。对于后一点,如果使用的通信是无线通信,系统就要发射无线电信号,于是它将破坏系统的无源性,一般说来,这不是使用无源定位系统的用户所期望的。因此,无源定位系统内部的通信原则上应做得尽量隐蔽,工作可能是突发的;如果是固定站工作,能用有线通信将更好。

无源定位的第三个特点是系统要经过复杂的计算才能获取目标的位置。形象地比喻,定位系统不像是照相机,一工作就可以把对面的图像拍下来;它是一个画家,先要听几个不同的人描述,对面的景像是个什么样子,然后想好了,画出来。首先是定位系统并不知道目标会发什么样的信号,因此在一定意义上,它开始工作时如同一个一般的电子对抗侦察设备,先要做信号截获和一般意义的分选处理。只有在这之后,它才意识到在面对的地域内有信号出现了,才有可能对它们定位。由于几个位置不在同一点的站将