

单站无源 定位跟踪技术



Passive Location and Tracking Technology by Single Observer

孙仲康 郭福成 冯道旺 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国家自然科学基金项目60702010 和
国防科学技术大学学术专著出版基金联合资助

单站无源定位跟踪技术

Passive Location and Tracking
Technology by Single Observer

孙仲康 郭福成 著
冯道旺 许耀伟 李宗华

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

单站无源定位跟踪技术/孙仲康等著. —北京:
国防工业出版社, 2008. 11

ISBN 978-7-118-05817-8

I. 单... II. 孙... III. 单站定位法—无源定位—
跟踪 IV. TN971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 092127 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)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 16 字数 446 千字

2008 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 48.00 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

在现代战争中,例如多次中东战争、两次伊拉克战争中,进攻或入侵一方一般采用战略战术手段首先将对方的信息获取系统、情报获取系统、通信传输系统、指挥控制系统以及由这些系统集成组合成的中心枢纽予以摧毁,使之瘫痪、失效,从而使对方“两眼一抹黑,双耳两失聪”,不了解战场上进攻入侵方的态势,无法实施对三军及其武器装备的指挥作战及火力配置,失去制空、制海权,听任进攻方在战场上实施各种摧毁、破坏、进攻、入侵的战术行动,置对方于无力还手的恶劣战场态势中。孙子兵法中说“知己知彼、百战不殆”,显然进攻一方必将首先使对方“眼失明,耳失聪”,或虚拟假的战场环境,使之“误入歧途”;而另一方则必须保持信息情报获取的手段和能力、识别判断战场环境和态势的手段和能力、指挥控制通信调度的手段和能力,力求“知己知彼”,达到有利于对付进攻入侵的作战,以获取胜利。

要保持“眼明耳聪”,必须首先在作战中确保情报、信息获取手段的生存能力,使之准确、及时、持续地履行其情报信息的获取功能。

随着精确制导的导弹武器射程的增长,对被攻击目标的远距离发现,远程瞄准火控攻击、远距离摧毁目标已成为可能,导致目前出现“先敌发现,先敌攻击,先敌摧毁”的作战理论。它将随着精确制导武器的射程增大及以卫星飞机为载体的侦察定位系统的全球、全战区覆盖能力的增强,这种“远程”“先敌”中远程的距离将越来越大,“先敌”空间的间隔距离也将越来越远,在这种情况下,作为受攻击的一方,为了“保存自己,消灭敌人”也要做到在隐蔽自己的条件下,反制对方的“先敌发现,先敌攻击,先敌摧毁”。总之,现代战争中制胜的要诀之一是:“隐蔽自己,先敌发现,先敌攻击,先敌摧毁”。

IV

一、战场信息获取的隐蔽性、及时性、准确性

在平时和作战中应持续地、尽早尽快地、尽可能准确地获取战场信息。

首先,要隐蔽地去获取对方目标、战场部署及其态势和动向。“隐蔽”的目的是既可以保存自己的情报、信息获取的手段和能力,又可以使对方处于“不知不觉”的状态之中。

其次,采用的情报、信息获取手段,其作用距离、区域覆盖范围、识别判断性能要尽可能远、尽可能大、尽可能好,使战场上对方的信息不至于被遗漏、被误认。在持续不断的搜索侦察中可以尽早尽快地正确地发现有用的战场目标、态势和动向。

再次,在配合作战火力控制的场合下,情报信息获取的手段要准确地发现目标及其在战场上的准确几何部署和运动态势,以便实施瞄准攻击及火力控制。这样能使导弹发射及火炮射击得以实施准确的火控攻击计算及火力发射,摧毁目标。

二、有源探测定位系统及其面临的威胁

自从第二次世界大战期间发明雷达以来,靠发射电磁波信号,并接收目标散射返回的回波信号获取目标距离,以及靠定向天线指向目标获取目标方向的有源探测定位系统,被广泛地应用在各军兵种的早期预警、指挥引导、火控瞄准、导弹制导等各个方面,成为各种战斗场合下有效的、重要的信息获取手段。

“有矛必有盾”,为了使有源探测定位系统(如雷达)失效、毁损,以无源侦察、无源定位、消极和积极干扰、反辐射导弹、隐身技术、隐蔽潜入等技术为主导的电子对抗技术,严重地威胁着各种雷达的生存能力、探测定位能力。用电子对抗技术对付雷达探测定位,在中东战争、马岛战争、两次伊拉克战争中屡战屡胜,这种电磁频谱领域内的战争——“电子战”的作用,曾被某些军事专家评价为“大战爆发,胜者将是较好地控制和驾驭电磁频谱的一方”,“电子对抗和导弹、核武器具有同等重要的作用”。依同理,面临着电子对抗威胁的有源探测定位系统,也将奋起而反击。以反侦察、抗干扰、抗反辐射导弹、反隐身隐蔽“四抗能力”为主线的雷达反电子对抗,也在这场电子战争中不断发展壮大。“电子对抗”与“反电子对

抗”形成作战双方在电磁频谱领域内持续不断的、激烈的、却并无声息的斗争方式。

在对付电子对抗的威胁方面,雷达技术发展程度不同的国家和军队,有不同的对付电子对抗威胁的办法。对于雷达技术先进的一方,其雷达的反电子侦察能力可以不怕对方的电子侦察;其雷达的作用距离足够远,发射功率足够大,天线增益足够高,相扫天线足够灵活,天线旁瓣足够低,可以不怕对方的小功率干扰;其雷达的性能足以支撑其实施“先敌发现,先敌攻击,先敌摧毁”的“三先”设想,从而不怕中、短程反辐射或其他制导方式的导弹攻击;其雷达的载体本身是隐身设计、隐身材料构成或覆盖的,使对方有源探测作用距离大为缩减,为其实现“三先”设想提供有利条件。虽然在作战中他们的某些雷达也有“寂静”工作模式,但其各军兵种的各种载体上使用有源探测定位的雷达技术还是不可或缺的、有恃无恐的。对于雷达技术不够先进、国际水平差距较大的弱势一方而言,采用有源探测定位的雷达系统被侦察、受干扰、受反辐射导弹攻击、受目标隐身技术的威胁则是严重的。在弱势一方有源探测定位装备作用距离近、战术技术性能不够高的情况下,强势一方电子对抗的威胁越显严重。要使这种弱势被动的局面有所改变,必须要在如此“不对称”的条件下另辟蹊径。

三、电磁隐蔽条件下实现探测定位

在电子对抗与反电子对抗的斗争中,有源探测定位系统受到电子对抗严重威胁的起因或根源在于这种系统是靠有源辐射来实现目标探测与定位的。而这种有源辐射容易被侦察,有源辐射源的空间位置也容易被定位。这样电子对抗的一方有可能实施干扰、发射反辐射导弹、从盲区隐蔽进入、实施隐身潜入等措施,使弱势一方的有源探测定位系统处于受到严重威胁的不利地位。假如弱势一方能在电磁隐蔽条件下实现对目标的探测及定位,从而使另一方的电子对抗侦察系统失效而侦察不到,则电子对抗技术中的干扰、反辐射导弹等对抗措施无法实施,对付有源探测定位系统的隐身技术也起不到作用。

问题在于是否有这种技术?能否使探测定位在无源不辐射条件下电磁隐蔽地实施,并能在作战中满足对目标探测、识别、定位的战术技术要

求?目前,在电子侦察技术中已有无源测向、多站测向测时差的无源探测定位技术,这种技术在改善其测向精度、解决好单平台无源测距技术的条件下,可以实现类似单站有源雷达的探测定位功能。其特点是远距离探测定位、无辐射、电磁隐蔽,其前提条件是目标有雷达、导航、通信等信号辐射。

电磁隐蔽也可以在有源探测定位中予以实现,其技术途径是有源探测定位系统所辐射的信号波形与周围杂散的电磁环境相类似,使对方电子侦察时无法分辨出隐藏在周围杂散的电磁环境中的有源探测定位波形。使其真假不分,侦察不出,也就使电子对抗一方难以继续实施软、硬杀伤。噪声雷达就是这样一种体制。如何使这种低截获概率(Low Probability Intercept, LPI)体制雷达能在作战中实际应用,需要予以关注和发展。

有源探测定位系统易受电子对抗的威胁,而无源探测定位系统的前提是目标有信号辐射。如果把有源和无源工作模式融合成为一体,使之既具有对远距离辐射目标实施无源探测定位,又能对无辐射“寂静”的目标在合适的距离上实施有源探测定位。这样,在适当采用两种工作模式的战术应用中,可以获得更多的“胜券”。

四、国内外无源探测定位技术的发展概况

无源探测定位技术,在电子对抗领域的电子侦察技术中早已有之。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。国内在1984年有关学术会议上及参考文献[2]已提出采用无源探测定位系统实现测向交叉定位、距离差多站定位、距离和多站或距离和结合测向定位,以无源电磁隐蔽的方式来对抗电子侦察,并实现对有电磁辐射目标的隐蔽探测和定位。近二十年来,多站无源探测定位技术和系统的研究,在国内也已有所建树。多站体制的无源探测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困难。在陆基使用中,由于多站几何配置影响到定位精度,这就对多站选址及系统装备机动引入实际困难。假如能实现单站无源探测定位,像单站有源探测定位系统那样,就可以使战术应用更加机动,减

不少由多站定位系统中几何配置引入的技术难度,更适用于陆基、空基、海基场合。这种单站无源探测定位系统装备可纳入“探测定位网”,成为网中的成员,也可由多个单站无源探测定位装备融合为多站体制的无源探测定位系统。

传统的单基地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(Bearings Only, BO))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某种形式机动(如要求舰船按“Z”形运动),具有收敛速度慢、容易发散等缺点,而在实战环境下难以实用。

(一) 国外研究状况

为了提高单基地无源定位的收敛速度和定位精度,国外开展了单基地无源高精度快速定位技术的研究,主要集中于机载观测平台对于地面固定辐射源快速定位的研究,在这方面已经进入试飞试验和装备生产、应用阶段。由于技术保密等原因,公开的技术性资料较少,仅仅有较简单的新闻报道。近年来几个比较典型的试验及应用系统如下:

(1) 测向和定位系统(Direction-Finding and Location System, DFLS)^[11]:美国电子防御(Journal of Electronic Defense, JED)杂志于1992年12月发布了有关休斯(Hughes)雷达系统公司研制了一种能快速测出辐射源信号到达角(Angle of Arrival, AOA)和距离的试验系统的消息,其采用三阵元组成长短基线的干涉仪,短基线测角度,长基线测相位变化率。该单基地无源定位系统在飞行试验中对地面雷达在5s之内实现测距,其相对误差达到2%。

(2) 精确测距系统(Precision Ranging Sub-System, PRSS)^[13]:洛克希德·马丁联合系统公司和美国艾那伦微波公司研制了一种以数字式射频存储器(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)为核心技术的无源测距系统。据报道,该系统在美国空军的F-16战斗机上试飞的结果表明,在17s~48s内,定位圆概率误差(Circular Error Probability, CEP)优于 $1\% \cdot R$ 。尽管系统离实战应用还得有一定的距离,但其将PRSS系统做成一块试验板置于侦察吊舱内,或连接在现有的雷达告警接收机(Radar Warning Receiver, RWR)上。该模块的插入,使原有的RWR具有快速定位功

能, 并比传统的测向(DF)接收机定位性能提高了一个数量级。

(3) 精确定位与识别系统(Precision Location and Identification, PLAID)^[12]: 经过相当长一段时间后, 1999年11月电子防务杂志发布了该系统研制成功的消息。它是在美国利顿(Litton)公司研制的高级数字接收机(Advanced Digital Receiver, ADR)基础上, 采用双阵元构成干涉仪测相位差变化率及时延测向对地面固定辐射源进行粗定位及精定位, 其测距相对误差在10s内收敛到10%。又据2001年10月电子防务杂志报道, 美国国防部和雷声公司签订合同, 将PLAID项目定型为改进型的AN/ALR-69雷达告警接收机, 装备在F-16、A-10、XC-130等飞机上。

以上有关机载单基地无源测距的报道属电子对抗领域试验性的情报报道, 有关无源测距的理论机理及方法报道较少。

(二) 国内研究状况

对于单站无源定位技术的研究, 国内早在1985年国防科学技术大学孙仲康教授提出了一种利用非机动单站测得的来波方向(Direction of Arrival, DOA)及来波到达时间(Time of Arrival, TOA)参数, 对运动辐射源实现被动定位和跟踪的概念^[3]。1986年—1992年经过多个博士、硕士研究生的探索研究, 参考文献[4, 6-9]对在二维、三维等速运动目标情况下无源定位跟踪的原理、跟踪算法、跟踪精度、可观测性及其在双基地雷达系统中的应用方面, 做了不少的探索研究^[10], 这引起了有关应用及研究部门的关注。这种无源定位技术, 不仅使用了无源探测系统通常容易获得的来波方向参数, 还扩充利用了无源系统可能获得的有关目标运动的其他测量参数, 如来波到达时间, 从而解除了单站只测向无源定位只适用于运动的机载无源系统对固定的地面辐射源多次测向交叉定位的限制。

从1994年起, 受1992年休斯公司的机载观测器对地面辐射源空对地无源测距定位试验^[11]的启发, 国防科学技术大学单基地无源系统与技术研究组在孙仲康教授的带领下, 根据国外新闻报道, 开始跟踪国外最新研究进展, 探索单基地无源快速高精度定位的物理机理和算法模型, 并进行了大量的计算机数字仿真。1998年, 通过博士生的课题研究, 找出了空对地无源测距定位的物理原理及计算公式。在此基础上, 1999年起,

取得了突破性的原创理论成果,建立了基于质点运动学原理的单基地无源测距定位新理论,研究了相应的跟踪定位算法,该技术的定位精度比传统技术有较大提高,同时定位时间缩短了一个数量级。2002年国防科学技术大学因陋就简采用光学技术对角度 β 、角速度 $\dot{\beta}$ 观察器自身加速度定位技术的原理进行了物理试验获得成功,以及采用注入式仿真角度、角速度、径向加速度 a_0 技术跟踪运动目标获得了成功,同时研究组还因该技术获得了两项国防专利。

2003年8月和2005年8月,国防科学技术大学与中国兵器工业集团206研究所在西安分别进行了地面对地面运动辐射源及地面对机载运动辐射源的单基地无源定位试验,取得了成功。两次外场试验结果证明:利用运动学原理实现无源测距定位,在理论、方法、数字仿真以及外场实物试验等方面是正确的,在现有工程技术条件下实现单基地无源定位技术是可行的。

本书撰写的无源探测定位技术和系统,以单站无源定位与跟踪(Single Observer Passive Location and Tracking, SOPLAT)技术为主线。在国内对此技术研究两个阶段中,以20世纪90年代中期开始的基于运动学原理单站无源测距定位技术为重点,主要介绍了实现这种单站无源测距定位的运动学理论基础、单站无源测距的两种主要技术途径、无源定位跟踪的非线性滤波算法、定位及跟踪的误差分析、无源定位跟踪系统的可观测性分析。在理论、技术及数字仿真研究的基础之上,开展了光学半实物及注入式的仿真试验,进行了外场的陆基运动辐射源及空基运动辐射源的无源定位跟踪技术试验,验证了单站无源测距理论的正确性、技术的可行性、工程上的可实现性,并展示了这种单站无源探测定位技术和系统的广阔应用前景。

本书内容是由国防科学技术大学单站无源定位与跟踪课题组的师生,通过近20年的探索研究、试验实践基础上总结、归纳出来的。内容主要取材于各阶段的研究、论证、试验报告,各阶段从事研究的博士及硕士研究生论文内容。参加研究工作的有周晓丽、张铭、周一宇、刘国霖、陈永光、刘荣、莫龙滨、许耀伟、郭福成、安玮、冯道旺、李宗华、杨争斌等硕士、博士研究生。他们的研究对推进单站无源被动定位技术的研究作出了贡

献,付出了辛勤劳动,本书撰写的主要内容大都取材于许耀伟、郭福成、冯道旺和李宗华等的研究工作及博士论文,其中许耀伟首次发现的利用运动学实施二维和三维固定目标的公式,郭福成对此方法进行了扩展并进行了实践试验,冯道旺提出的修正极坐标扩展卡尔曼滤波(Modified Polar Coordinates Extended Kalman Filter, MPCEKF)跟踪算法,测量径向加速度的技术和方法,获得了满意的外场试验结果。在试验研究硬件和试验方法方面,皇甫堪教授、卢启中副教授、辛勤副教授、冯道旺博士、龚享铨博士、柳征博士和李大治博士等作出了很大的贡献。单站无源测距定位技术外场试验能够实施和获得成功,应该感谢中国兵器工业集团 206 研究所的大力支持及密切合作。本书涉及的有关外场试验成果,其中有中国兵器工业集团 206 所参与试验的包永洁、郭敏、朱道光等高工和一批技术人员的杰出贡献。本课题的研究从申请立项、开展研究、多次外场试验及撰写书稿中都受到李均教授的大力支持,在此一并表示谢意。

国防科学技术大学
单站无源探测定位与跟踪课题组
2008 年 4 月

目 录

第 1 章 无源定位的基本原理	1
1.1 空间定位的原理	1
1.2 定位误差的度量	5
1.3 无源探测定位问题	9
1.3.1 无源探测定位技术	9
1.3.2 无源探测系统可能获得的观测量	11
1.3.3 无源系统可能的定位体制	17
1.4 利用 DOA 及 TOA 测量的单站无源测距定位技术	21
1.4.1 实现单站无源定位的一种思路	21
1.4.2 利用 DOA 及 TOA 测量定位的数学推导	26
1.4.3 定位跟踪算法	29
第 2 章 基于运动学原理的单站无源测距定位技术	41
2.1 质点运动学原理	41
2.1.1 质点运动学的基本原理	41
2.1.2 不同坐标系内质点的速度和加速度	45
2.1.3 运动学对提取目标运动距离矢量的启示	48
2.2 两种基本的无源测距方法	52
2.2.1 切向运动测距的几何解说	53
2.2.2 径向运动测距的几何解说	54
2.3 由测量参数导出的测距方法	57
2.3.1 目标斜距矢量上的径向加速度	57
2.3.2 径向加速度的另一表达式	59
2.3.3 无源测距公式	60

2.3.4	获得未知的相对运动加速度信息的一点思考	64
第3章	利用切向运动测距定位的技术	65
3.1	利用角变化率对固定目标的二维测距定位方法	65
3.1.1	方向及方向变化率的二维测距	65
3.1.2	用角速度测距时的定位误差分布	66
3.2	用相位差变化率对固定目标测距定位方法	73
3.2.1	干涉仪的角度变化率倍增作用	73
3.2.2	相位差变化率测距公式及定位公式	74
3.2.3	相位差变化率测距时的误差分析	74
3.2.4	相对测距误差分布图	77
3.2.5	多次测量时的统计处理	78
3.3	利用角变化率对固定目标的三维测距定位方法	87
3.3.1	三维测距公式	87
3.3.2	单次测距误差分析	87
3.3.3	单次测距定位仿真	89
3.3.4	多次观测定位模型	91
3.3.5	多次观测定位计算机仿真	98
3.4	利用相位差变化率对运动辐射源的二维定位跟踪	103
3.4.1	运动观测站对运动辐射源无源定位跟踪的可观测性	103
3.4.2	观测站载机注入机动的形式	107
3.4.3	利用相位差变化率无源定位跟踪的非线性滤波算法	108
3.4.4	计算机仿真及结果	115
3.4.5	利用相位差变化率二维无源跟踪的性能分析	116
3.5	估计目标速度矢量的定位跟踪方法	121
3.5.1	估计目标速度矢量的定位原理	121
3.5.2	利用时域和空域信息估计目标运动速度	123
3.5.3	对目标定位跟踪	127
3.5.4	估计目标速度矢量定位算法的定位误差分析	127

3.6	估计目标速度矢量的定位跟踪算法仿真与结果分析	129
3.6.1	利用时域和空域参数的多测量子集定位仿真	130
3.6.2	递推滤波的定位算法仿真和性能分析	131
3.6.3	估计目标速度矢量的定位算法仿真和性能分析	134
第4章	利用径向运动测距定位的技术	137
4.1	单次测距定位原理	137
4.1.1	对静止目标的测距原理	137
4.1.2	对匀速运动目标的测距原理	139
4.1.3	测距误差分析	141
4.2	多次定位的模型和方法	144
4.2.1	坐标系选择	144
4.2.2	各种运动状态下的跟踪模型	145
4.2.3	跟踪模型的统计特性	150
4.2.4	跟踪精度理论分析	154
4.2.5	几种多次定位方法及仿真	157
4.3	基于观测域滤波的目标跟踪算法	167
4.3.1	观测域滤波的原理	167
4.3.2	利用角度和径向加速度的跟踪算法	170
4.3.3	滤波器的初始化	173
4.4	数值仿真试验	174
4.4.1	二维目标的跟踪仿真试验	174
4.4.2	三维目标的跟踪仿真试验	177
4.4.3	增加角速度观测的算法仿真	179
第5章	目标非线性跟踪滤波算法及比较	181
5.1	非线性滤波方法的分类及特点	181
5.2	最优滤波估计及其性能的度量	183
5.2.1	最优滤波估计	183
5.2.2	定位效率检验	185
5.3	无源定位中的跟踪滤波算法	186
5.3.1	伪线性估计方法	186

5.3.2	扩展卡尔曼滤波方法	187
5.3.3	迭代扩展卡尔曼滤波方法	188
5.3.4	UKF 跟踪滤波算法	188
5.3.5	MGEKF 滤波方法	192
5.3.6	RVEKF 滤波方法	195
5.3.7	修正协方差的扩展卡尔曼滤波方法	196
5.3.8	修正极坐标的扩展卡尔曼滤波器	198
5.3.9	粒子滤波	199
5.4	跟踪滤波算法的仿真比较	200
5.4.1	利用角度及其变化率对三维匀速运动 目标跟踪定位举例	200
5.4.2	利用角度及其变化率对三维固定目标定位举例	203
5.4.3	利用离心加速度信息对二维运动目标跟踪 定位举例	204
第 6 章	基于质点运动学的单站无源定位可观测性分析	206
6.1	引言	206
6.2	利用角度及其变化率参数的可观测性分析	207
6.2.1	非线性系统的可观测分析方法	207
6.2.2	对匀速运动目标定位的可观测性理论分析	208
6.2.3	对匀速运动目标定位可观测性仿真分析	211
6.2.4	对多项式机动模型目标定位可观测性理论分析	212
6.2.5	对多项式机动模型目标的不可观测特例仿真分析	217
6.3	利用加速度信息的定位可观测性	220
6.3.1	匀速运动目标的可观测性	220
6.3.2	对于机动目标的二维可观测分析	220
6.4	时空参数测量定位时可观测性分析	224
6.4.1	时空参数对匀速运动目标二维定位可观测性分析	224
6.4.2	时空参数对机动运动目标二维定位可观测性分析	231
6.4.3	时空参数对匀速运动目标的三维定位可观测 性分析	234

第 7 章 基于质点运动学的单站无源定位参数测量技术	239
7.1 角度和角速度参数的测量技术	239
7.1.1 旋转扫描测角方法	239
7.1.2 单脉冲跟踪测角方法	241
7.1.3 干涉仪测量角度及角速度方法	241
7.1.4 三种体制测量角变化率比较	245
7.2 径向加速度参数的测量技术	248
7.2.1 径向加速度参数的测量	251
7.2.2 信号相位参数的估计及其精度分析	257
7.2.3 正弦信号中径向加速度参数的估计	264
7.2.4 相位调制信号中径向加速度参数的估计	272
7.2.5 径向加速度测量的结论	281
7.3 时域参数的测量技术	282
7.3.1 脉冲到达时间测量	282
7.3.2 脉冲到达时间差估计	290
7.3.3 脉冲重复周期估计	294
7.4 观测器位置和姿态参数的测量	303
7.5 观测器载体姿态运动下的测量参数稳定问题	303
7.5.1 坐标系及坐标变换	304
7.5.2 机动载体干涉仪测向定位中相位差变化率的获取	309
第 8 章 目标机动下的跟踪滤波方法	312
8.1 目标可能出现的典型机动形式	312
8.2 机动目标运动模型	314
8.2.1 离散匀速模型	314
8.2.2 离散匀加速模型	314
8.2.3 Singer 模型	315
8.2.4 转弯模型	317
8.3 基于机动检测的自适应滤波方法	319
8.3.1 多级噪声自适应法	319
8.3.2 变维滤波法	320

8.4	无源跟踪机动目标的交互式多模型算法	321
8.5	机动目标单站无源定位仿真举例	324
8.5.1	三种目标运动模型的比较	324
8.5.2	不同机动跟踪算法的仿真比较	327
8.6	基于 UT 变换的机动目标交互多模跟踪算法	330
8.6.1	基于 Sigma 点滤波的机动目标 IMM 跟踪算法	330
8.6.2	机动目标单站无源定位仿真分析	333
8.7	逼近最优模型预测的多模型算法	342
8.7.1	多模型逼近最优一步预测	342
8.7.2	逼近最优模型预测的机动跟踪算法	345
8.7.3	仿真分析	347
第 9 章	单站无源测距定位技术及系统的仿真	354
9.1	仿真技术的作用	354
9.2	角度及其变化率无源跟踪定位的光学半实物仿真	355
9.2.1	仿真试验目的及缩比原理	355
9.2.2	半实物仿真试验结构	357
9.2.3	试验步骤和流程	358
9.2.4	试验数据处理和计算方法	359
9.2.5	实际试验数据和数据处理	365
9.3	注入式频率变化率定位半实物仿真试验报告	371
9.3.1	试验结构框图	371
9.3.2	试验场景设计	372
9.3.3	使用的仪器	372
9.3.4	仿真步骤	372
9.3.5	仿真算法说明	373
9.3.6	对连续波信号的仿真试验结果	374
9.3.7	进一步的注入式仿真试验结果	377
第 10 章	单站无源定位的外场模拟试验	380
10.1	外场缩比试验原理	380
10.2	陆基单站无源定位地面试验	382