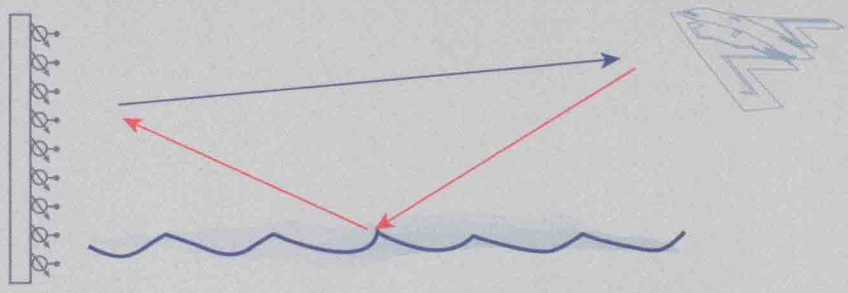

LOW ANGLE TRACKING TECHNIQUES FOR ARRAY RADARS

阵列雷达低角跟踪技术

徐振海　肖顺平　熊子源　著

科学出版社

阵列雷达低角跟踪技术

徐振海　肖顺平　熊子源　著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书阐释了低角跟踪问题本质，总结了低角跟踪技术途径，研究了多径机理与模型，针对阵列雷达体制提出并实现了三大类八种低角跟踪方法，并进行了方法对比分析与总结。

全书共 11 章，内容包括：多径机理与模型、改进单脉冲类方法（包括对称波束法、双零点法）、谱搜索类方法（包括子空间匹配法、子孔径法、波束域法）、解相干类方法（包括空间平滑法、频率分集法、极化平滑法）。书中对上述方法的原理与实际性能进行了深入研究。

本书内容新颖，系统性强，理论联系实际，可供雷达工程技术领域的科研人员阅读，也可作为高等院校和科研院所电子工程专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

阵列雷达低角跟踪技术/徐振海，肖顺平，熊子源著. —北京：科学出版社，2014

ISBN 978-7-03-039011-0

Ⅰ. ①阵… Ⅱ. ①徐…②肖…③熊… Ⅲ. ①信号处理-雷达-研究 Ⅳ. ①TN959

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 256859 号

责任编辑：余 丁 张 宇 / 责任校对：李 影

责任印制：肖 兴 / 封面设计：蓝 正

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 3 月第 一 版 开本：B5(720×1000)

2014 年 3 月第一次印刷 印张：11

字数：204 000

定价：55.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

藏書 图書馆

作 者 简 介

徐振海　男，1977 年生，博士，副教授，硕士生导师。2004 年 6 月获工学博士学位，2006～2008 年在中国电子科技集团公司第十四研究所做博士后研究工作。出版学术专著 2 部，以第一作者发表论文 50 余篇，主持国家自然科学基金项目、中国博士后科学基金项目（一类）、863 计划项目、总装武器装备预研项目等，参与 973 计划项目、总装演示验证项目等多项，获军队科技进步二等奖 2 项，获国防专利 2 项，获三等功 1 次。目前从事阵列雷达低角跟踪、子阵划分以及群目标分辨等关键技术的研究。

肖顺平　男，1964 年生，教授，博士生导师。电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室副主任。国防科学技术大学国家重点学科信息与通信工程学术带头人之一，国家 863 计划专家，总装备部仿真技术专业组专家，中国电子学会无线电定位技术分会委员、副秘书长。主要从事信号处理与目标识别、综合电子战等方面的教学与科研工作。

熊子源　男，1986 年生，硕博连读研究生。在 *IEEE Trans*、*IEEE Letter*、《电子学报》等期刊发表论文 10 余篇，参与国家自然科学基金项目、863 计划项目、总装武器装备预研项目等。目前从事阵列雷达最优子阵划分及处理的研究。

序

观测贴近地面或海面运动的低空目标是雷达探测的一个重点问题。由于可以利用地球曲率对雷达直线视距的限制和背景杂波的掩护，贴近地面或海面从低空进入对方雷达观测区域被当成一种对付雷达观测的有效电子对抗措施。雷达探测任务主要包括目标检测与目标参数测量。目标检测是在很强的杂波背景中实现的，需要在频率域区分运动目标与背景杂波的多普勒频移差异，因而检测低速运动的小目标尤其困难。对于两坐标雷达来说，由于只对目标距离与方位角两个参数进行测量，因此雷达检测发现目标后，经过目标确认、跟踪启动，在跟踪过程中只需测量目标的距离与方位角，因而对低仰角目标的跟踪过程与检测过程没有大的差异，只是在采用多波束雷达与相控阵雷达情况下，检测与跟踪过程可以采用不同的信号形式、波束驻留时间与数据采样率。在很多情况下，为满足对目标进行精确跟踪与火控制导的要求，在测量目标距离、方位的同时还需测量目标的仰角，并根据目标仰角与斜距计算出目标离地高度。这是目前大多数三坐标雷达，特别是岸防三坐标雷达与舰载三坐标雷达的基本任务。

对于新一代三坐标雷达，为了实现目标分类、识别，在跟踪过程中实现的参数测量内容不断增加。多参数测量不仅有利于多目标航迹关联，还可实现基于目标特征的信号检测，改善目标检测性能和剔除虚假目标信息等。对低空三坐标雷达来说，要增加目标参数测量内容，首先应提高对低仰角目标的连续跟踪性能，但这与高仰角目标跟踪相比，即与一般三坐标雷达相比更为困难，其主要原因是多径效应。在跟踪低仰角目标时，由于电波传播过程中存在地面或海面镜像反射引起的多径效应，对地面或海面上方单一目标的仰角估计受到其镜像目标的影响，单一目标变为由真实目标与其虚拟目标构成的成对目标。当雷达分辨率不够高，无法在角度与距离上分辨开时，精确估计目标的仰角位置变得困难，这使得精确测量低空目标的高度或仰角方法备受重视，成为雷达研究领域中的一个重要研究课题。如果再考虑地面、海面反射系数的变化以及地面粗糙度与海面波浪的影响，低仰角目标的镜像将变为由多个镜像构成的垂直分布的条带目标，这将使得精确估计低仰角目标高度，并对其进行连续跟踪变得更为困难。国内外都很重视这一问题的解决，在目标高度测量原理、技术体制、信号设计和处理算法等各个方面，

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

都有人提出和试验过不少解决方法。目前尚未见到专门讨论低空测高与低空目标跟踪的专著，这是作者迎难而上，撰写该书的主要动力。

徐振海在中国电子科技集团公司第十四研究所博士后工作站从事研究工作期间，对雷达低空测高问题进行过比较全面、深入的研究工作，除了在理论上创新探讨外，还进行了大量计算和外场试验，在此期间积累的科研成果为本书写作提供了必要的理论与技术基础。书中对造成低角跟踪困难的主要原因（即多径效应产生的机理）进行分析，结合非高分辨雷达的实际使用情况，先对采用改进单脉冲测角实现低角跟踪的方法进行讨论，然后将阵列信号处理理论用于对低空目标及其镜像目标的空间谱进行估计，获得目标及其镜像的来波方向，并在此基础上提出了几种新的低仰角跟踪方法。仿真计算与试验数据分析表明，书中提出的低仰角跟踪方法对提高低仰角目标跟踪性能是有作用的。

希望该书的出版能为从事低仰角目标跟踪研究工作的单位与科技人员提供参考，相信会有更多的有关专著问世，促进我国雷达事业的创新发展。

张光义

中国工程院院士

2013 年 8 月于南京

前　言

利用雷达探测盲区实现低空、超低空突防是现代战争中常用的战术手段。多径效应是导致雷达对低空、超低空目标跟踪性能下降甚至失效的重要原因，在舰载雷达、陆基米波雷达等应用场合尤其突出。低角跟踪是一个几乎接近“经典”的老问题，从20世纪60年代开始，国际雷达界针对海面多径问题开展了大量理论与实验研究，提出了多种解决思路与方法，发表了许多重要文献，在舰载雷达应用方面取得了重要突破。然而对于陆基米波雷达而言，低角跟踪仍然是其技术瓶颈。

作者有幸在中国电子科技集团公司第十四研究所做博士后，期间重点研究了米波三坐标雷达测高问题，出站后在国家自然科学基金、中国博士后科学基金(一类)的资助下继续深入研究。历经八年时间，查阅了1971年以来所有文献，针对阵列雷达体制提出并实现了三大类八种低角跟踪方法，分析处理了大量实测数据，取得了一批富有工程应用价值的研究成果。试图以此为基础撰写一本关于阵列雷达低角跟踪方面的专著，对该问题进行理论概括和技术总结。

本书全面、系统地研究了阵列雷达低角跟踪的概念、模型、方法、性能与结论。全书共11章。第一章绪论，重点介绍低角跟踪的概念，包括低角跟踪问题本质、可能的技术途径以及阵列雷达低角跟踪研究现状。第二章研究多径反射机理以及阵列雷达回波建模问题。第三章针对阵列雷达研究并实现了对称波束单脉冲方法。第四章针对阵列雷达研究并实现了双零点单脉冲方法。以上两种方法可以归结为改进单脉冲类方法。第五章研究子空间匹配法。第六章研究子孔径法。第七章研究波束域法。以上三种方法可以归结为谱搜索类方法，子空间匹配法相当于阵元域处理，子孔径法和波束域法相当于降维处理，子孔径法和波束域法均可以通过自适应技术实现。第八章研究空间平滑法。第九章研究频率分集法。第十章研究极化平滑法。以上三种方法可以归结为解相干类方法。第十一章结束语，详细对比分析各种方法的性能、特点以及系统实现代价，并指出值得进一步研究的方向。本书具有以下三个鲜明特色：

一、选题新颖。关于低角跟踪问题，相关成果都散见于各类文献，据作者所知，本书是国内外关于阵列雷达低角跟踪这一专门问题的第一部学术著作。

二、系统性强。全书自成体系，每种方法独立成章，便于读者查阅使用。

三、理论联系实际。研究追求可工程化的方法，力求简单实用，本书所涉及的方法，大都经过了实测数据的检验，甚至可以直接应用于雷达工程型号。

本书由徐振海执笔，肖顺平审校全稿。同时还得到了熊子源、张亮、吴佳妮等

博士研究生以及戴崇、黄艳刚、黄坦、宋聃等硕士研究生的帮助，在阵列雷达的研究道路上有各位相伴，并肩战斗，共同进步，是一大幸事。与雷达界泰斗、前辈、同事、朋友的讨论使作者受益匪浅，不仅开阔了学术视野，了解了雷达工程实践，更重要的是更新了做学问的理念，深刻体会到“理论联系实际”以及“工程创新”的重要意义。在本书的写作酝酿阶段，更得到了中国工程院院士、著名雷达专家张光义的鼓励与支持，他全面细致地审阅了初稿，提出了许多中肯的意见，并亲自为本书作序。特别感谢王国玉研究员对该项研究的关注与支持。

本书将有利于初涉此专题的研究者从卷帙浩繁的文献中解放出来，并结合具体的雷达工程实践在本书的基础上进行再创新。若能为雷达装备的工程研制提供参考与借鉴，将是作者莫大的荣耀！

限于作者水平，加之该领域仍处于发展之中，书中疏漏之处在所难免，肯请读者批评指正。

作　者

电子信息系统复杂电磁环境效应

国家重点实验室

2013 年 8 月于长沙

目　录

序

前言

第一章　绪论 …… 1

1.1　低角跟踪概述 …… 1

1.1.1　问题由来 …… 1

1.1.2　问题界定 …… 3

1.1.3　技术难点 …… 3

1.1.4　误差成因 …… 4

1.1.5　军事需求 …… 4

1.2　低角跟踪技术途径 …… 6

1.2.1　复角技术 …… 6

1.2.2　改进单脉冲 …… 7

1.2.3　多维高分辨 …… 8

1.2.4　频率分集或捷变 …… 9

1.2.5　极化选择 …… 9

1.2.6　多目标估计 …… 9

1.3　阵列雷达低角跟踪研究现状 …… 9

1.3.1　匹配场法 …… 10

1.3.2　子孔径法 …… 10

1.3.3　自适应天线阵法 …… 12

1.3.4　波束域法 …… 12

1.3.5　精确多径模型法 …… 14

1.3.6　极化分集法 …… 21

1.3.7　研究概况 …… 23

1.4　本书概貌 …… 24

参考文献 …… 26

第二章　多径机理与模型 …… 29

2.1　引言 …… 29

2.2　多径几何关系 …… 29

2.2.1　理想平面反射 …… 29
2.2.2　近似平面反射 …… 30
2.2.3　球面反射 …… 31
2.3　菲涅尔区及瑞利判据 …… 31
2.3.1　菲涅尔区 …… 32
2.3.2　瑞利判据 …… 33
2.4　镜面反射机理 …… 33
2.4.1　镜面反射系数 …… 34
2.4.2　发散因子 …… 40
2.4.3　粗糙度因子 …… 40
2.5　漫反射机理 …… 41
2.6　多径条件下阵列信号模型 …… 42
2.7　小结 …… 44
附录 2A　球面多径求解 …… 44
参考文献 …… 45
第三章　对称波束法 …… 46
3.1　引言 …… 46
3.2　基本原理 …… 46
3.3　对称差波束形成 …… 48
3.3.1　约束条件 …… 48
3.3.2　对称差波束形成 …… 48
3.3.3　最优对称差波束形成 …… 50
3.4　对称波束单脉冲测角算法 …… 51
3.4.1　和通道、差通道热噪声 …… 51
3.4.2　多径加热噪声条件下单脉冲测角 …… 52
3.4.3　非镜像对称多径单脉冲比 …… 52
3.5　性能分析 …… 53
3.5.1　与 SNR 的关系 …… 53
3.5.2　与目标仰角的关系 …… 54
3.5.3　与 ρ 的关系 …… 54
3.6　实测数据处理 …… 55
3.7　小结 …… 57
附录 3A　对称差波束权矢量推导 …… 57
附录 3B　对称差波束方向图推导 …… 58

附录 3C　差波束极限证明 …… 58
参考文献 …… 59
第四章　双零点法 …… 60
4.1　引言 …… 60
4.2　基本原理 …… 61
4.3　双零点单脉冲测角算法 …… 62
4.3.1　多径阵列信号模型 …… 62
4.3.2　ML 估计 …… 62
4.3.3　双单脉冲测角 …… 63
4.3.4　复反射系数估计 …… 65
4.4　修正和波束方向图、差方向图及鉴角曲线 …… 65
4.4.1　修正和波束、差波束权矢量 …… 65
4.4.2　修正和波束方向图、修正差波束方向图 …… 66
4.4.3　单脉冲鉴角函数 …… 66
4.5　性能分析 …… 68
4.5.1　与 SNR 的关系 …… 68
4.5.2　与目标仰角的关系 …… 68
4.5.3　与 ρ 的关系 …… 69
4.6　实测数据处理 …… 70
4.7　小结 …… 71
附录 4A　ML 方程 …… 71
附录 4B　导向矢量求导 …… 71
附录 4C　修正和波束方向图、修正差波束方向图推导 …… 72
参考文献 …… 73
第五章　子空间匹配法 …… 74
5.1　引言 …… 74
5.2　多径阵列信号模型 …… 75
5.3　算法原理 …… 75
5.3.1　ML 谱估计 …… 75
5.3.2　ρ 估计 …… 76
5.3.3　几何解释 …… 76
5.4　性能分析 …… 77
5.4.1　与 SNR 的关系 …… 77
5.4.2　与目标仰角的关系 …… 78

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

5.4.3　与 ρ 的关系 …… 79
5.5　实测数据处理 …… 81
5.5.1　实测数据仰角谱 …… 81
5.5.2　失效原因量化分析 …… 81
5.6　小结 …… 82
参考文献 …… 83
第六章　子孔径法 …… 84
6.1　引言 …… 84
6.2　多径阵列信号模型 …… 84
6.3　子阵划分 …… 85
6.4　算法原理 …… 85
6.4.1　子阵级协方差矩阵 …… 85
6.4.2　正交矢量 …… 86
6.4.3　子阵级仰角谱 …… 86
6.4.4　ρ 估计 …… 86
6.5　最优化实现 …… 87
6.6　性能分析 …… 88
6.6.1　与 SNR 的关系 …… 88
6.6.2　与目标仰角的关系 …… 88
6.6.3　与 ρ 的关系 …… 90
6.7　实测数据处理 …… 92
6.8　小结 …… 93
附录 6A　矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的求解 …… 93
附录 6B　正交矢量求解 …… 94
参考文献 …… 94
第七章　波束域法 …… 95
7.1　引言 …… 95
7.2　多径阵列信号模型 …… 96
7.3　正交波束形成 …… 96
7.4　算法原理 …… 97
7.4.1　波束域协方差矩阵 …… 97
7.4.2　正交矢量 …… 97
7.4.3　波束域仰角谱 …… 98
7.4.4　ρ 估计 …… 98

7.5　最优化实现 …… 99
7.6　性能分析 …… 100
7.6.1　与 SNR 的关系 …… 100
7.6.2　与目标仰角的关系 …… 101
7.6.3　与 ρ 的关系 …… 102
7.7　实测数据处理 …… 104
7.8　小结 …… 105
附录 7A　矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的求解 …… 105
附录 7B　正交矢量求解 …… 106
参考文献 …… 107
第八章　空间平滑法 …… 109
8.1　引言 …… 109
8.2　多径阵列信号模型 …… 109
8.3　空间平滑与去相干效能 …… 110
8.3.1　前向平滑 …… 110
8.3.2　去相干效能 …… 112
8.4　FSS-MUSIC 谱估计 …… 113
8.5　性能分析 …… 114
8.5.1　与子阵数的关系 …… 114
8.5.2　与 SNR 的关系 …… 115
8.5.3　与目标仰角的关系 …… 116
8.5.4　与 ρ 的关系 …… 117
8.6　实测数据处理 …… 119
8.7　小结 …… 120
参考文献 …… 121
第九章　频率分集法 …… 122
9.1　引言 …… 122
9.2　去相干原理 …… 123
9.3　多频多径阵列信号模型 …… 126
9.3.1　ρ 模型 …… 126
9.3.2　多频阵列信号模型 …… 127
9.4　MFML 谱估计 …… 127
9.4.1　MFML-Ⅰ型仰角谱函数 …… 128
9.4.2　MFML-Ⅱ型仰角谱函数 …… 128

9.4.3 两型仰角谱函数之间的关系 …… 129
9.4.4 多频抑制仰角模糊机理 …… 131
9.4.5 栅瓣间隔 …… 133
9.4.6 频点数与系统带宽 …… 134
9.5 性能分析 …… 137
9.5.1 测角性能的度量 …… 138
9.5.2 与 SNR 的关系 …… 139
9.5.3 与目标仰角的关系 …… 140
9.5.4 最小 SNR 与目标仰角的关系 …… 141
9.6 小结 …… 142
参考文献 …… 143
第十章 极化平滑法 …… 145
10.1 引言 …… 145
10.2 多径极化阵列信号模型 …… 146
10.2.1 极化敏感阵列与几何关系 …… 146
10.2.2 直达信号极化模型 …… 146
10.2.3 ρ 模型 …… 147
10.2.4 反射信号极化模型 …… 147
10.2.5 多径极化阵列接收信号模型 …… 148
10.3 极化平滑与去相关效能 …… 149
10.3.1 极化平滑原理 …… 149
10.3.2 去相干效能 …… 150
10.4 PS-MUSIC 谱估计 …… 151
10.5 性能分析 …… 152
10.5.1 与 SNR 的关系 …… 152
10.5.2 与目标仰角的关系 …… 152
10.5.3 与极化角的关系 …… 154
10.6 小结 …… 155
参考文献 …… 155
第十一章 结束语 …… 157
11.1 基本结论 …… 157
11.2 方法对比 …… 158
11.3 研究展望 …… 160
11.3.1 漫反射问题 …… 160
11.3.2 机载雷达多径问题 …… 160
11.3.3 多目标问题 …… 161
参考文献 …… 161

第一章 绪 论

1.1 低角跟踪概述

1.1.1 问题由来

在雷达探测领域，低角跟踪[1,2]（low angle tracking，LAT）是一个几乎接近“经典”的老问题，其问题根源就是多径效应。多径效应严重影响着低空（低仰角）目标的探测性能，尤其对舰载雷达和陆基米波雷达影响严重。

当雷达跟踪位于地/海平面以上、天线波束宽度以内的低仰角目标（简称低角目标）时，目标回波通过多条路径到达雷达接收天线，称为多径现象。从目标直接到达雷达天线的信号称为直达信号，通常只有一条；通过地球表面反射到达雷达天线的信号称为多径信号。多径信号由镜面反射分量和漫反射分量构成，当反射面起伏程度较小时，以镜面反射为主，通常镜面反射也只有一条；当反射面起伏程度较大时，以漫反射为主，漫反射可以认为是随机分布在一定角度范围的、幅度较小的镜面反射信号的集合。图 1.1 给出了低角跟踪时镜面多径现象示意图，镜面反射信号相当于反射面以下“镜像”目标的回波。

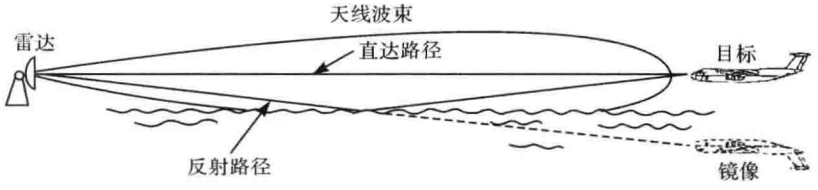

图 1.1 低角跟踪时镜面多径现象示意图

多径信号的存在使得雷达跟踪性能急剧下降，仰角测量性能无法满足实际要求。由多径效应引起的跟踪误差称为低角跟踪误差。美国海军研究实验室（Naval Research Laboratory，NRL）在切萨皮克湾最早开展了低角跟踪实验研究。图 1.2 为 S 波段雷达低角跟踪误差曲线[2]，它反映了多径反射信号从天线的旁瓣进入主瓣过程中跟踪误差的变化。天线波束俯仰宽度为 2.7°，目标以等高度（3000ft，1ft=0.3048m）远离雷达向外飞行，并配有信标源。开始跟踪时目标仰角为 4°，在跟踪时间为 8.5min 以前，多径信号位于天线的旁瓣，对跟踪角精度影响

较小。在跟踪时间为 8.5min 以后，目标仰角小于 2°，多径信号进入天线波束的主瓣，多径信号引起较大的跟踪误差，并且跟踪误差呈现出周期性，接近于正弦振荡，严重时甚至丢失目标。

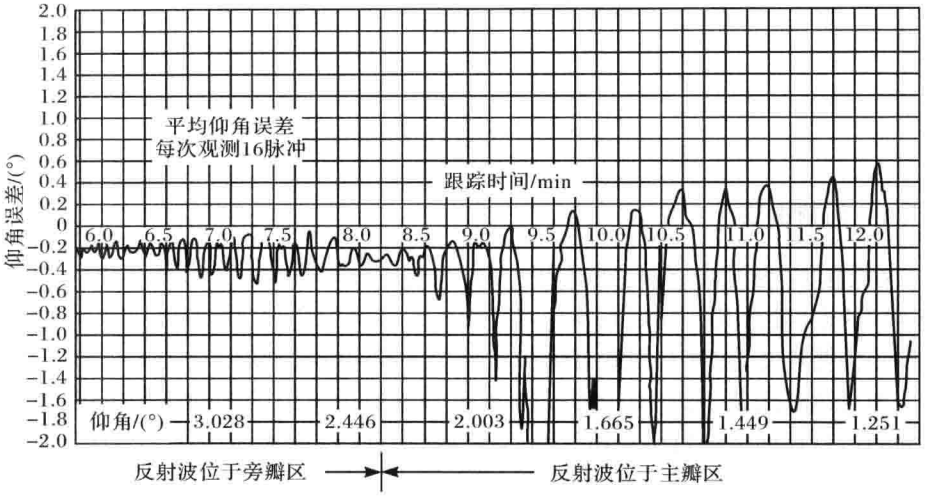

图 1.2 S波段雷达低角跟踪误差曲线

跟踪误差振荡现象可以通过理论仿真进行解释，仿真场景和系统参数与美国海军研究实验室实验雷达完全一致，仿真得出的低角跟踪误差曲线如图 1.3 所示。可以看出两者振荡规律比较相似，理论和实际吻合得相当好，只是外场实验中雷达偶尔跟踪镜像目标，而理论仿真中该现象并没有出现。

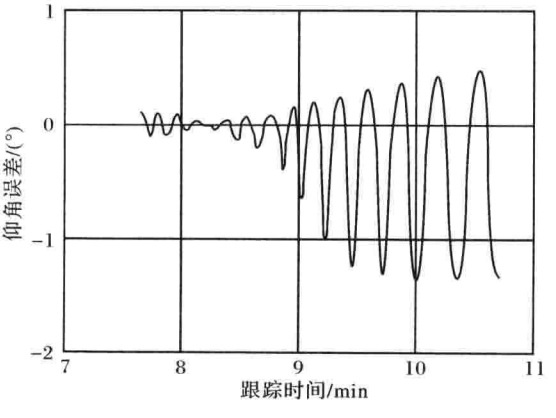

图 1.3 理论仿真低角跟踪误差曲线

1.1.2 问题界定

所谓“低仰角”是相对天线波束俯仰宽度而言的，当天线波束指向水平方向，目标仰角小于 1/2 波束宽度时，称为低仰角。例如，若目标仰角为 3°，对于俯仰宽度为 8°的雷达而言称为低仰角，而对于俯仰宽度为 2°的雷达就不能称为低仰角了。另外，对于脉冲雷达而言，只有当直达信号与镜面反射信号路程差小于距离分辨率时，才会发生干涉现象，如果路程差大于距离分辨率，则镜面反射信号与直达信号分别位于不同距离单元，多径对直达信号的测角影响不大。因此，低角跟踪有两个特定条件：第一，目标仰角小于天线波束俯仰宽度的 1/2；第二，直达与多径信号路程差小于距离分辨率。

低角跟踪是国际雷达界约定俗成的概念，主要是指雷达目标仰角或高度的测量，不涉及航迹的关联滤波问题。该问题主要属于雷达信号处理的范畴，而非雷达数据处理范畴。当然也有少量文献[3~5]探讨多径条件下航迹关联滤波问题，但是本书不涉及该部分内容。

此外，在目标径向距离精确测量的前提下，可以根据目标的距离和仰角导出目标的高度，因此，目标仰角测量与高度测量是等价的。

1.1.3 技术难点

低角跟踪技术的核心就是克服多径效应的影响，提高目标仰角的测量精度。Barton[2]指出，当测角误差大于 1/10 波束宽度时，低角跟踪是无效的；当测角误差达到 1/20～1/10 波束宽度时，低角跟踪是有效的。如果测角精度达到 1/100 波束宽度，则称高精度测角。通常情况下，当目标仰角小于 1/4 波束宽度时，大多数低角跟踪方法是无效的。低角跟踪技术的难点在于：

第一，多径信号与直达信号分辨困难。从空域来看，目标直达信号与多径信号到达角之间的夹角很小，远小于天线俯仰波束主瓣宽度；从时域来看，多径信号与直达信号的路程差远小于距离分辨率，因此它们在时域强烈相关，即相干；从频域来看，多径信号与直达信号的多普勒频率几乎相同，因此在空域、时域和频域都无法分辨多径信号和直达信号。

第二，反射面特性是未知和时变的。反射面特性与工作频率、极化、表面起伏度、植被覆盖、相对介电常数等诸多因素有关。通常反射区域的这些特征参数是未知的，并且在雷达探测过程中，反射区域随着目标运动而运动，因此反射面的特性是时变的。Skolnik[6]特别指出：虽然雷达传播基础理论很好理解，但获取雷达工作环境必要信息的困难使得在特定地点和特定时间上准确地量化预测传播特性并不容易，从某种意义上说，地/海面反射特性的预测像天气预报一样困难。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com