



国防科技图书出版基金

超宽频带被动雷达 寻的器测向技术

Direction-Finding Technology of
Ultra-Wide Band Passive Radar Seeker

■ 司伟建 陈涛 林晴晴 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

超宽频带被动雷达 寻的器测向技术

Direction - Finding Technology of
Ultra - Wide Band Passive Radar Seeker

司伟建 陈 涛 林晴晴 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

超宽频带被动雷达寻的器测向技术/司伟建,陈涛,林晴晴
著. —北京:国防工业出版社,2014. 10
ISBN 978-7-118-09445-9

I. ①超… II. ①司… ②陈… ③林… III. ①超宽带
雷达—测向系统—研究 IV. ①TN953

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 212122 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 315 千字

2014 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加

兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授、以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

**国防科技图书出版基金
第七届评审委员会组成人员**

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 (按姓氏笔画排序)

才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
刘泽金	孙秀冬	陆军	芮筱亭
李言荣	李德仁	李德毅	杨伟
肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威
陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
傅惠民	魏炳波		

前 言

反辐射被动寻的器(导引头)测向技术是电子对抗重要分支之一。随着雷达技术的发展,雷达抗干扰性能越来越好,采用雷达关机、LPI 技术、脉间波形变换技术、配置雷达诱饵等,使装配传统的宽频带反辐射导引头的反辐射导弹失效,失去了原有的作用和威力。将反辐射被动寻的器作为远程导引模式,把反辐射导弹导引到红外成像、毫米波主动雷达等精确末制导的作用距离范围内、视角范围内,由精确末制导对目标进行攻击,是反辐射导弹发展方向之一。这对反辐射被动寻的器(导引头)测向技术提出了新的要求:测向精度高,保证把反辐射导弹导引到末制导视角范围内;天线位置摆放要灵活,满足复合制导条件下不同制导模式的 天线或传感器天线盘孔径的共用;抗诱饵能力,在雷达加装诱饵情况下不被诱偏。传统的反辐射被动寻的器(导引头)测向方法有比幅测向、比相测向、比幅比相测向等,这些方法均难以满足天线位置灵活摆放的要求,且这些方法不具备抗诱饵能力。本书正是基于传统的反辐射被动寻的器(导引头)测向技术的应用缺陷,结合近些年的科研项目,针对反辐射被动寻的器(导引头)测向技术未来发展方向,提出了立体基线、阵列测向等新理论、新方法、新技术,从而实现新型的超宽频带反辐射被动寻的器(导引头)测向技术满足现代战争对反辐射导弹的技术要求。

本书共 4 章。第 1 章介绍测向的目的、测向技术分类,以及对测向系统的基本要求。第 2 章介绍多种反辐射被动寻的器(导引头)使用的宽频带天线、原理,给出了设计方法和参数。第 3 章论述了立体基线测向基本模型和原理,推导了立体基线测向误差公式,比较了非均匀圆阵和均匀圆阵的测向性能及立体阵列和平面阵列的测向性能,并给出了仿真分析。第 4 章论述了谱估计算法的基本原理,给出了数学模型,阐述了多种信源数估计方法,和阵列误差校正算法,并给出了仿真分析,论述了阵列基线旋转测向算法,推导了公式并给出仿真实验分析。

本书是国内专门论述反辐射被动寻的器(导引头)测向技术比较全面且新颖的一本专著,总结了在实际中遇到的技术问题时所采取的解决途径与方法。本书可以作为工程技术人员的参考书,读者可根据需要选看有关部分内容。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点或错误,我们殷切希望广大读者批评指正。

著 者

2013 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 对辐射源测向的目的	1
1.2 测向技术分类	1
1.2.1 从时域上分类	1
1.2.2 按到达角信息形成分类	2
1.3 对测向系统的基本要求	2
第 2 章 超宽频带天线技术	4
2.1 概述	4
2.2 圆柱螺旋天线	5
2.2.1 圆柱螺旋天线的参数	5
2.2.2 法向辐射的圆柱螺旋天线	7
2.2.3 轴向辐射的圆柱螺旋天线	8
2.3 螺旋天线	14
2.4 锥形四臂对数螺旋天线	15
2.4.1 锥螺旋宽频带性能	15
2.4.2 影响锥螺旋频宽的主要因素	16
2.4.3 2~18GHz 锥螺旋	17
2.4.4 2~18GHz 的锥螺旋天线实测性能	19
2.5 双模四臂螺旋天线	21
2.5.1 辐射器	21
2.5.2 波束形成网络	23
2.6 双臂平面螺旋天线	25
2.6.1 平面螺旋天线的工作原理	26
2.6.2 平面二次型螺旋天线	27
2.7 2~100GHz 平面螺旋天线	28

2.8	曲折臂天线	29
2.8.1	曲折臂天线的原理	30
2.8.2	曲折臂天线的极化转换结构	31
2.8.3	曲折臂天线的简化设计	31
2.8.4	巴伦设计	32
2.8.5	90°混合电路的设计	33
2.8.6	单刀双掷开关方案	33
2.8.7	双圆极化曲折臂天线的性能	34
2.9	N 臂(大于四臂)的曲折臂天线	34
2.10	超宽带对数周期天线	44
2.11	对数周期振子天线	47
2.12	超宽带对数周期贴片天线	52
2.13	平面对数周期天线	53
2.14	对数周期振子天线	55
2.14.1	天线的主要参数	55
2.14.2	天线的设计	56
2.14.3	对数周期振子天线的特点	59
2.15	隙缝天线	59
2.15.1	辐射特性	63
2.15.2	槽线的激励	64
2.16	渐变式微带隙缝天线	65
2.17	锥形隙缝天线	66
2.18	宽带圆极化平面螺旋与螺旋线天线	67
第3章	基于立体基线的超宽频带被动雷达寻的器测向技术	68
3.1	立体基线测向技术	69
3.1.1	立体基线测向原理	69
3.1.2	多值模糊问题及解决方法	70
3.2	天线阵列模型及测向角度求解方法	71
3.2.1	平面阵列天线模型	71
3.2.2	立体阵列天线模型	72
3.3	平面天线阵列的测向误差	74
3.3.1	立体基线算法测向误差理论分析	74

3.3.2	影响立体基线算法测向误差的因素	81
3.3.3	立体基线算法测向误差仿真验证	87
3.4	立体天线阵列的测向误差	91
3.4.1	测向误差理论推导	91
3.4.2	测向误差的影响因素	99
3.4.3	测向误差仿真验证	106
3.5	非均匀圆阵与均匀圆阵测向性能仿真分析	110
3.5.1	仿真程序流程图	111
3.5.2	平面五元天线阵模型建立	111
3.5.3	计算机仿真	112
3.5.4	存在通道不一致性测向性能仿真分析	117
3.6	立体阵列和平面阵列测向性能仿真分析	120
3.6.1	立体基线仿真流程及条件	120
3.6.2	天线模型建立	122
3.6.3	立体阵列与平面阵列测向性能仿真分析	123
3.6.4	存在通道不一致性测向性能仿真分析	128
第4章	阵列测向——空间谱估计高分辨、高精度测向	131
4.1	概述	131
4.1.1	理论基础	131
4.1.2	MUSIC 算法的原理	134
4.1.3	典型阵列形式及阵列流型矩阵	137
4.1.4	几个相关的概念	140
4.2	色噪声背景下的信源数估计方法	141
4.2.1	引言	141
4.2.2	基于信息论准则的信源数估计方法	142
4.2.3	基于协方差矩阵对角加载的信源数估计方法	147
4.2.4	基于盖尔圆盘定理的信源数估计方法	150
4.2.5	基于聚类分析的信源数估计新方法	153
4.2.6	基于特征子空间投影的信源数估计方法	156
4.2.7	基于延时预处理的信源数估计方法	158
4.2.8	计算机仿真与实测数据实验	162
4.3	阵列一阶模糊问题研究	170

4.3.1	阵列模糊问题描述	170
4.3.2	平面阵的一阶模糊问题研究	171
4.3.3	仿真实验	173
4.4	基于 MUSIC 算法的二次搜索解模糊方法	175
4.4.1	二次搜索法的基本原理	175
4.4.2	二次搜索角度区间的确定	176
4.4.3	二次搜索法的步骤和性能分析	177
4.4.4	二次搜索法与长短基线解模糊法比较	178
4.4.5	虚拟阵列扩展解模糊方法	178
4.4.6	计算机仿真实验	182
4.5	阵列结构性能	185
4.5.1	引言	185
4.5.2	基于微分几何的阵列性能	187
4.6	阵列误差校正算法	195
4.6.1	阵列天线通道不一致性校正的辅加阵元法	195
4.6.2	基于遗传算法的阵元位置误差校正方法	200
4.6.3	计算机仿真与实测数据实验	205
4.6.4	实测数据测试及结果分析	210
4.7	宽带相干信号测向技术	211
4.7.1	概述	211
4.7.2	宽带信号阵列模型	214
4.7.3	基于相干信号的处理方法	217
4.7.4	二维宽带相干信号快速测向算法	220
4.7.5	仿真实验	221
4.8	基于阵列基线旋转的 MUSIC 测向算法	223
4.8.1	均匀圆阵下二维 MUSIC 算法	224
4.8.2	基于阵列基线旋转的 MUSIC 测向算法原理	226
4.8.3	仿真实验分析	230

参考文献	241
------------	-----

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Purpose for direction finding	1
1.2 Classification for direction finding technology	1
1.2.1 Classification according to the time domain	1
1.2.2 Classification according to the information of DOA	2
1.3 Basic requirements for direction finding system	2
Chapter 2 Ultra Wide Band (UWB) Antenna Technology	4
2.1 Preface	4
2.2 Cylinder helical antenna	5
2.2.1 Parameters of cylinder helical antenna	5
2.2.2 Normal radiation cylinder helical antenna	7
2.2.3 Axial radiation cylinder helical antenna	8
2.3 Helical antenna	14
2.4 Tapered quadrifilar log periodic helix antenna	15
2.4.1 Property of tapered helical wide band	15
2.4.2 Major influence factors of tapered helical band	16
2.4.3 2~18GHz tapered helix antenna	17
2.4.4 Measured performance of 2~18GHz tapered helix antenna	19
2.5 Dual mode antenna quadrifilar helix antenna	21
2.5.1 Radiator	21
2.5.2 Beam – former	23
2.6 Two – arm broadband spiral antenna	25
2.6.1 Operating principle of broadband spiral antenna	26
2.6.2 Broadband quadratic form spiral antenna	27
2.7 2~100GHz broadband spiral antenna	28

2. 8	Zigzag arm antenna	29
2. 8. 1	Principle of zigzag arm antenna	30
2. 8. 2	Polarization switching structure of zigzag arm antenna	31
2. 8. 3	Simplified design of zigzag arm antenna	31
2. 8. 4	Balun Design	32
2. 8. 5	Design of 90°hybrid circuit	33
2. 8. 6	Scheme of single – pole double – throw (SPDT)	33
2. 8. 7	Performance of circularly polarized antenna	34
2. 9	N – arm(more than four) zigzag arm antenna	34
2. 10	UWB log – periodic antenna	44
2. 11	Log – periodic dipole antenna	47
2. 12	UWB log – periodic patch antenna	52
2. 13	Planar log – periodic antenna	53
2. 14	Parameters and design of log – periodic dipole antenna	55
2. 14. 1	Major parameters of antenna	55
2. 14. 2	Accurate design	56
2. 14. 3	Characteristic of log – periodic dipole antenna	59
2. 15	Slot antenna	59
2. 15. 1	Radiation characteristic	63
2. 15. 2	Motivation of slot liner	64
2. 16	Graded – Index micro – strip slot antenna	65
2. 17	Taper slot antenna	66
2. 18	Wideband circular polarization plane helix and helical antenna(AS – 48611)	67

Chapter 3 Spatial Baseline Direction Finding Technology

	of UWB Passive Radar Seeker	68
3. 1	Spatial baseline technology	69
3. 1. 1	Principle of spatial baseline	69
3. 1. 2	Multiple – value problem and solution	70
3. 2	Antenna array model and direction angle calculation method	71
3. 2. 1	Planar array antenna model	71
3. 2. 2	Stereoscopic array antenna model	72

3.3	Direction finding error of plane antenna array	74
3.3.1	Theory analysis of direction finding error of spatial baseline algorithm	74
3.3.2	Main factors affect on spatial baseline algorithm	81
3.3.3	Simulation of direction finding error of spatial baseline algorithm	87
3.4	Direction finding error of spatial antenna array	91
3.4.1	Theoretical derivation of direction finding error	91
3.4.2	Influencing factor of Direction finding error	99
3.4.3	Computer simulation	106
3.5	Simulation analysis for direction finding performance of non uniform circular array and uniform circular array	110
3.5.1	Flow block diagram of simulated program	111
3.5.2	Model building of plane array with five antennas	111
3.5.3	Computer simulation	112
3.5.4	Direction finding performance simulation with channel inconsistency	117
3.6	Direction finding performance simulation analysis of solid array and planar array	120
3.6.1	Simulation process and conditions of spatial baseline	120
3.6.2	Antenna model	122
3.6.3	Computer simulation	123
3.6.4	Direction finding performance simulation with channel inconsistency	128

Chapter 4 Array Direction Finding – High Resolution, High Accuracy

	Direction – Finding by Spatial Spectrum Estimation	131
4.1	Summarize	131
4.1.1	Theoretical basis	131
4.1.2	Principle of MUSIC algorithm	134
4.1.3	Typical array form and array flow matrix	137
4.1.4	Several related concepts	140
4.2	Source number estimation method at colored noise background	141

4. 2. 1	Introduction	141
4. 2. 2	Source number estimation method based on Akaike information criterion	142
4. 2. 3	Source number estimation method based on covariance matrix diagonal loading	147
4. 2. 4	Source number estimation method based on Gerschgorin's disk theorem	150
4. 2. 5	Source number estimation method based on clustering analysis ...	153
4. 2. 6	Source number estimation method based on feature subspace projection	156
4. 2. 7	Source number estimation method based on delay pretreatment ...	158
4. 2. 8	Computer simulation and measured data experiment	162
4. 3	Research on first - order ambiguity of array	170
4. 3. 1	Problem description of array ambiguity	170
4. 3. 2	Research on first - order ambiguity of plane array	171
4. 3. 3	Computer simulation	173
4. 4	Ambiguity solving method by secondary search based on MUSIC algorithm	175
4. 4. 1	Principle of secondary search method	175
4. 4. 2	Determination of angle interval of secondary search method	176
4. 4. 3	Steps and performance analysis of secondary search method	177
4. 4. 4	Comparison of secondary search method and long - short base line	178
4. 4. 5	Ambiguity solving method of virtual array expansion	178
4. 4. 6	Computer simulation	182
4. 5	Performance of array structure	185
4. 5. 1	Introduction	185
4. 5. 2	Array performance based on differential geometry	187
4. 6	Array error correction algorithm	195
4. 6. 1	Additional array element method for array channel inconsistency correction	195
4. 6. 2	Array element location error correction algorithm based on genetic algorithm	200

4. 6. 3	Computer simulation and measured data experiment	205
4. 6. 4	Measured data test and result analysis	210
4. 7	Wide band coherent signal direction finding technology	211
4. 7. 1	Summarize	211
4. 7. 2	Wide band signal array model	214
4. 7. 3	Processing method for coherent signal	217
4. 7. 4	Fast direction finding algorithm for two dimensional wide band coherent signal	220
4. 7. 5	Computer simulation	221
4. 8	MUSIC algorithm for array baseline rotation	223
4. 8. 1	Two dimension MUSIC algorithm under uniform circular array ...	224
4. 8. 2	Principle of MUSIC algorithm for array baseline rotation	226
4. 8. 3	Computer simulation	230
Reference		241