

综合脉冲孔径雷达

Synthetic Impulse and Aperture Radar

陈伯孝 吴剑旗 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

Synthetic Impulse and Aperture Radar

综合脉冲孔径雷达

陈伯孝 吴剑旗 等著

绪论

综合脉冲孔径雷达的系统设计

综合脉冲孔径雷达波形和处理

SIAR的长时间相参积累方法

SIAR数字单脉冲跟踪技术

距离与角度之间的耦合及解耦

SIAR在强干扰背景下目标的检测与跟踪

阵列误差对SIAR跟踪精度的影响

双基地综合脉冲孔径地波雷达试验系统

微波稀布阵综合脉冲孔径雷达

综合脉冲孔径雷达的主要学术论文目录

北
國
防
工
業
出
版
社

<http://www.ndip.cn>

图书在版编目(CIP)数据

综合脉冲孔径雷达/陈伯孝等著. —北京:国防工业出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-118-07408-6

I. ①综... II. ①陈... III. ①脉冲孔径雷达—研究 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 134372 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公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 16 字数 272 千字

2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 68.00 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

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

第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波



前言

Preface

几次现代战争表明,随着隐身技术、反辐射导弹(ARM)、综合电子干扰(ECM)和低空突防技术的发展,特别是隐身技术的迅速发展,对雷达提出了新的挑战 and 更高的要求。传统雷达已难以应付这种挑战,必须寻找新的对抗措施。为了对付这“四大威胁”,现代雷达要求综合运用一系列先进技术,研制新体制雷达。特别是米波雷达,在反隐身方面有显著的优越性。

综合脉冲孔径雷达(SIAR)是一种全新体制的米波分布阵雷达,具有反隐身、低截获概率、抗反辐射导弹、抗干扰性能好、四维分辨率和精度高等特点,对解决隐身飞机及其它低可观测目标的预警和拦截引导是一种有效的手段。该雷达采用稀布阵列天线,克服了米波雷达分辨率差的不足;通过各个阵元全向发射正交编码频率信号以使得各向同性照射,在接收端通过信号处理形成接收与发射波束。由于其独特的体制和工作方式,使得它与常规雷达有许多不同之处,也出现一些在传统雷达中不存在的问题。本书结合工程实际,系统讨论该雷达的工作原理、信号处理方法、目标测量技术和试验结果等。同时,将综合脉冲孔径技术应用于高频和微波波段,在接收站综合利用发射阵列孔径的岸—舰双基地综合脉冲孔径地波雷达试验系统和微波稀布阵综合脉冲孔径雷达。

全书共分 10 章。第 1 章绪论,介绍 SIAR 的基本特征及其“四抗”性能。第 2 章综合脉冲孔径雷达的工作原理与组成。第 3 章综合脉冲孔径雷达波形和处理,介绍 SIAR 的主要信号形式及其信号处理方法。第 4 章 SIAR 的长时间相参积累方法,针对 SIAR 的长时间相干积累特点及其存在的问题,提出一种基于运动补偿和时频分析的长时间相干积累方法和基于步进频率脉冲综合的长时间相参积累方法。第 5 章 SIAR 数字单脉冲跟踪技术,介绍 SIAR 目标四维参数(距离、方位、仰角、速度)的精密测量与跟踪方法。第 6 章 SIAR 距离与角度之间的耦合影响及其解耦,研究一种优化分配各阵元发射信号频率编码的准则,克服距离、方位和仰角之间由于相互测不准而产生的耦合影响。第 7 章 SIAR 在强干扰背景下目标检测与跟踪,介绍自适应干扰置零技术在 SIAR 中的应用,定量分析孔径带宽积、通道幅相误差以及 A/D 变换器的量化噪声对大型稀布圆形阵列天线(SIAR)干扰对消效果的影响。第 8 章阵列误差对 SIAR 跟踪精度的影响,定量分析几种阵列误差对测量与跟踪精度的影响。第 9 章岸一艘双基地综合脉冲孔径地波雷达试验系统,介绍这种新体制的地波超视距雷达的工作原理及其试验结果。第 10 章介绍微波稀布阵综合脉冲孔径雷达。

SIAR 实际上就是一种典型的 MIMO 雷达。国内外研究热门的 MIMO 雷达也采用了 SIAR 的思想。英国牛津大学研究人员在引用我们的论文时这样评价:“MIMO radar is inspired mainly by the synthetic impulse and aperture radar (SIAR) ...”。统计 MIMO 雷达概念的提出者——美国新泽西大学、Bell 实验室等研究机构的学者在引用我们的论文时这样描述:“Recently, a new and interesting concept in array radar has been introduced by the synthetic impulse and aperture radar (SIAR) ...”。因此,本书的出版对 MIMO 雷达的研究具有更大的促进作用。

撰写本书的目的是为了读者能系统、全面、深入地了解 and 掌握稀布阵综合脉冲孔径雷达的基本概念和工作原理;了解和掌握稀布阵综合脉冲孔径雷达的工作方式、信号处理方法等,及其与常规雷达的不同之处;以及这种雷达设计和研制的思路、方法及一些特殊考虑。

本书作者发表了 80 余篇稀布阵综合脉冲孔径雷达方面的学术论文。本书是作者近 20 年从事稀布阵综合脉冲孔径雷达方面的研究工作的结晶。作者一直从事雷达系统与雷达信号处理方面的研究,具有丰富的专业知识和实际经验。因此本书可供从事 SIAR、MIMO 雷达、数字化雷达及其它新体制雷达方面的工程技术设计和科学研究人员参考,对高等院校相关专业师生也有参考价值。

本书第 1、3 章由陈伯孝、吴剑旗撰写,第 2 章由吴剑旗、陈伯孝、江凯撰写,第 4~8 章由陈伯孝撰写,第 9 章由陈伯孝、陈多芳撰写,第 10 章由杨明磊、陈伯孝撰写。全书由陈伯孝统稿。在本书的撰写过程中,得到了中国工程院毛二可院士、王小谟院士、吴曼青院士、中国科学院保铮院士、清华大学彭应宁教授、西安电子科技大学张守宏教授等的指导与帮助,并提出了宝贵的修改意见;得到了中国电子科技集团公司第 38 研究所和西安电子科技大学联合成立的 SIAR 课题组的大力支持和帮助,在此我们一并表示衷心的感谢。

中国工程院毛二可院士、吴曼青院士、清华大学彭应宁教授在百忙中为本书申报国防科技图书出版基金写了推荐意见,在此向毛院士、吴院士、彭教授表示衷心的感谢。

我们编写这部专著的初衷是想为我国现代雷达事业的发展做出一点贡献。但鉴于水平有限,难免存在错误和不足之处,敬请广大读者批评指正。

感谢国防科技图书出版基金的支持和责任编辑程邦仁对本书编辑出版付出的辛勤劳动。

陈伯孝 吴剑旗

2010 年 10 月



目 录

Contents

第 1 章	1.1 现代雷达技术的发展 001
绪论	1.2 综合脉冲孔径雷达的基本特征 002
001	1.3 综合脉冲孔径雷达的“四抗”性能 004
	1.3.1 反隐身措施 004
	1.3.2 SIAR 雷达体制的反侦察性能 005
	1.3.3 SIAR 雷达体制的抗 ARM 性能 005
	1.3.4 SIAR 雷达体制的抗干扰性能 007
	1.4 综合脉冲孔径雷达与 MIMO 雷达 008
	1.5 本书概貌 010
	参考文献 012

Chapter 1	1.1 Development of modern radar 001
Introduction	1.2 Basic features of SIAR 002
001	1.3 Four antis of SIAR 004
	1.3.1 Anti-stealth 004
	1.3.2 Anti-reconnaissance 005
	1.3.3 Anti-ARM 005
	1.3.4 Anti-interference 007
	1.4 SIAR and MIMO Radar 008
	1.5 Organization of the book 010
	References 012

第2章 综合脉冲孔径雷达的 系统设计 015	2.1 引言 015 2.2 SIAR 的工作原理 016 2.2.1 正交编码信号 016 2.2.2 脉冲综合与孔径综合的基本概念 017 2.2.3 空时三维匹配滤波 019 2.2.4 发射波束综合 021 2.3 发射脉冲/孔径综合方法 023 2.3.1 SIAR 宽带信号模型 023 2.3.2 时频域脉冲综合处理 024 2.3.3 时域脉冲综合处理 025 2.3.4 频域脉冲综合处理 026 2.3.5 采样损失及其补偿 027 2.4 SIAR 的四维模糊函数 029 2.5 SIAR 的雷达方程 033 2.6 SIAR 试验系统组成 037 2.6.1 天馈分系统 038 2.6.2 发射机分系统 039 2.6.3 接收分系统 040 2.6.4 频率综合分系统 040 2.7 SIAR 幅相校正方法 041 2.8 SIAR 试验结果 045 2.9 大型随机稀布阵列 SIAR 049 2.10 小结 051 参考文献 052
Chapter 2 System design of SIAR 015	2.1 Introduction 015 2.2 Principles of SIAR 016 2.2.1 Orthogonal coded signal 016 2.2.2 Concepts of pulse synthesis and aperture synthesis 017 2.2.3 Spatial-temporal 3D matched filtering 019 2.2.4 Synthesis of transmit beam 021 2.3 Synthesis of transmit pulse/aperture 023 2.3.1 Wideband signal model of SIAR 023 2.3.2 Pulse synthesis in time and frequency domain 024

	2.3.3 Pulse synthesis in time domain 025
	2.3.4 Pulse synthesis in frequency domain 026
	2.3.5 Sampling loss and its compensation 027
	2.4 4D ambiguity function of SIAR 029
	2.5 Radar function of SIAR 033
	2.6 Experimental system of SIAR 037
	2.6.1 Antenna sub-system 038
	2.6.2 Transmitting sub-system 039
	2.6.3 Receiving sub-system 040
	2.6.4 Frequency synthetic sub-system 040
	2.7 Gain and phase calibration of SIAR 041
	2.8 Experimental result of SIAR 045
	2.9 SIAR with large random sparse array 049
	2.10 Brief summary 051
	References 052
第3章	3.1 引言 053
综合脉冲孔径雷达	3.2 SIAR 基本信号形式及其处理过程 054
波形和处理	3.3 线性调频信号在 SIAR 中的应用 057
053	3.4 SIAR 基于相位编码的脉冲压缩性能分析 061
	3.5 脉间频率编码捷变及其处理流程 067
	3.6 脉组频率编码捷变及其处理流程 074
	3.7 小结 075
	附录 3A 几个公式的推导 076
	参考文献 080
Chapter 3	3.1 Introduction 053
Waveform and signal	3.2 Waveform and signal processing of SIAR 054
processing of SIAR	3.3 Application of LFM signal in SIAR 057
053	3.4 Performance analysis of pulse compression for phased code signal in SIAR 061
	3.5 Pulse-to-pulse frequency-coding agility and its signal processing 067
	3.6 Frequency-coding agility among a set of pulses and its signal processing 074
	3.7 Brief summary 075

	Appendix 3A Deduction of some equation in this chapter 076
	References 080
第 4 章	4.1 引言 081
SIAR 的长时间相参	4.2 SIAR 长时间相参积累特点及其存在的问题 082
积累方法	4.3 SIAR 基于运动补偿和时频分析的长时间相参积累方法 085
081	4.4 SIAR 基于步进频率脉冲综合的长时间相参积累技术 090
	4.4.1 步进频率 SIAR 的脉冲综合处理 090
	4.4.2 目标运动对步进频率综合的影响 093
	4.5 计算机仿真 096
	4.6 小结 098
	参考文献 099
Chapter 4	4.1 Introduction 081
Long-time coherent	4.2 Long-time coherent integration of SIAR and the faults 082
integration of SIAR	4.3 Long-time coherent integration based on movement compensation and time-frequency analysis 085
081	4.4 Long-time coherent integration based on Pulse synthesis of stepped frequency 090
	4.4.1 Pulse synthesis of stepped frequency SIAR 090
	4.4.2 Influence of target movement on stepped frequency synthesis 093
	4.5 Computer simulation 096
	4.6 Brief summary 098
	References 099
第 5 章	5.1 单脉冲跟踪概述 100
SIAR 数字单脉冲	5.2 SIAR 跟踪处理信号模型 103
跟踪技术	5.3 目标距离的精密测量 105
100	5.3.1 频率分集法(正负频率脉冲综合法) 105

	5.3.2 前后脉冲综合法 107
	5.3.3 测距精度 110
	5.3.4 计算机仿真 111
	5.4 SIAR 目标方向的测量 112
	5.5 多普勒频率的测量 116
	5.6 小结 119
	参考文献 120
Chapter 5	5.1 Introduction to monopulse tracking 100
Digital monopulse	5.2 Signal model for SIAR tracking 103
tracking of SIAR	5.3 High-accuracy measurement of target
100	distance 105
	5.3.1 Distance measurement with Frequency diversity pulse synthesis 105
	5.3.2 Distance measurement with lead-lay pulse synthesis 107
	5.3.3 Accuracy of range measurement 110
	5.3.4 Computer simulation 111
	5.4 Measurement of target direction 112
	5.5 Measurement of Doppler frequency 116
	5.6 Brief summary 119
	References 120
第 6 章	6.1 引言 121
距离与角度之间的	6.2 角度误差对测距的耦合影响 122
耦合及解耦	6.3 距离量化误差对测角的耦合影响 124
121	6.4 基于 Fisher 信息矩阵的距离-角度耦合分析 127
	6.5 优化频率编码与三维去耦分析 128
	6.6 计算机仿真 133
	6.7 小结 134
	参考文献 134

Chapter 6 Coupling and decoupling between range and angle in SIAR 121	6.1 Introduction 121 6.2 Coupling effect of angle error on range measurement 122 6.3 Coupling effect of range quantization error on angle measurement 124 6.4 Range-angle Coupling based on Fisher information matrix 127 6.5 Optimization of frequency codes and 3D decoupling 128 6.6 Computer simulation 133 6.7 Brief summary 134 References 134
第 7 章 SIAR 在强干扰背景下目标的检测与跟踪 136	7.1 引言 136 7.2 SIAR 系统抗干扰措施 137 7.3 SIAR 自适应置零处理及其计算机仿真 138 7.4 在有源干扰下 SIAR 目标距离的测量 140 7.5 在有源干扰下 SIAR 目标方向的测量 142 7.6 SIAR 旁瓣对消性能分析 143 7.6.1 稀布圆阵干扰对消性能 144 7.6.2 提高 SIAR 自适应旁瓣干扰对消措施 148 7.6.3 计算机模拟 148 7.7 小结 149 参考文献 150
Chapter 7 Target detection and tracking of SIAR in strong interference background 136	7.1 Introduction 136 7.2 Anti-interference properties of SIAR 137 7.3 Adaptive nulling of SIAR and computer simulation 138 7.4 Measurement of target range in active interference background 140 7.5 Measurement of target direction in active interference background 142

	7.6 Performance analysis of Side lobe cancellation in SIAR 143
	7.6.1 Performance of interference cancellation with sparse circular array 144
	7.6.2 Measures to improve the performance of adaptive sidelobe cancellation 148
	7.6.3 Computer simulation 148
	7.7 Brief summary 149
	References 150
第 8 章	8.1 引言 152
阵列误差对 SIAR	8.2 阵元幅相误差对跟踪精度的影响 153
跟踪精度的影响	8.2.1 信号模型 153
152	8.2.2 幅相误差对单脉冲测角精度的影响 154
	8.2.3 幅相误差对测距精度的影响 156
	8.2.4 计算机仿真 157
	8.3 通道失配对跟踪精度的影响 158
	8.3.1 通道失配信号模型 159
	8.3.2 通道失配对 SIAR 跟踪精度的影响 161
	8.3.3 计算机仿真 164
	8.4 正交通道不平衡对跟踪精度的影响 165
	8.4.1 信号模型 165
	8.4.2 I、Q 分量不平衡对跟踪精度的影响 166
	8.4.3 计算机仿真 168
	8.5 小结 169
	参考文献 169
Chapter 8	8.1 Introduction 152
Influence of array	8.2 Influence of array gain and phase errors on
error on accuracy	tracking accuracy 153
of SIAR tracking	8.2.1 Signal model 153
152	8.2.2 Influence of gain and phase errors
	on angle measurement based
	on monopulse 154

- 8.2.3 Influence of gain and phase errors
on range measurement 156
- 8.2.4 Computer simulation 157
- 8.3 Influence of channel mismatch on tracking
accuracy 158
 - 8.3.1 Signal model of channel mismatch 159
 - 8.3.2 Influence of channel mismatch on
SIAR tracking accuracy 161
 - 8.3.3 Computer simulation 164
- 8.4 Influence of unbalance between orthogonal
channels on tracking accuracy 165
 - 8.4.1 Signal model 165
 - 8.4.2 Influence of unbalance between
in-phase and quadrature channels
on tracking 166
 - 8.4.3 Computer simulation 168
- 8.5 Brief summary 169
- References 169

第9章

双基地综合脉冲孔径 地波雷达试验系统 171

- 9.1 引言 171
- 9.2 试验系统组成及特点 173
 - 9.2.1 发射分系统 174
 - 9.2.2 接收分系统 175
 - 9.2.3 系统特点 176
- 9.3 双基地综合脉冲孔径地波雷达波形参数设计 177
 - 9.3.1 调频(扫频)周期 T_m 的选取 178
 - 9.3.2 扫频带宽和调制斜率 179
 - 9.3.3 重复周期 T_r 和脉冲宽度 T_p 179
 - 9.3.4 工作频率 $\{f_i\}$ 的选择方法 180
- 9.4 双基地综合脉冲孔径地波雷达的工作原理 181
 - 9.4.1 雷达的信号处理流程 181
 - 9.4.2 发射同步信息提取 182
 - 9.4.3 发射综合处理 186