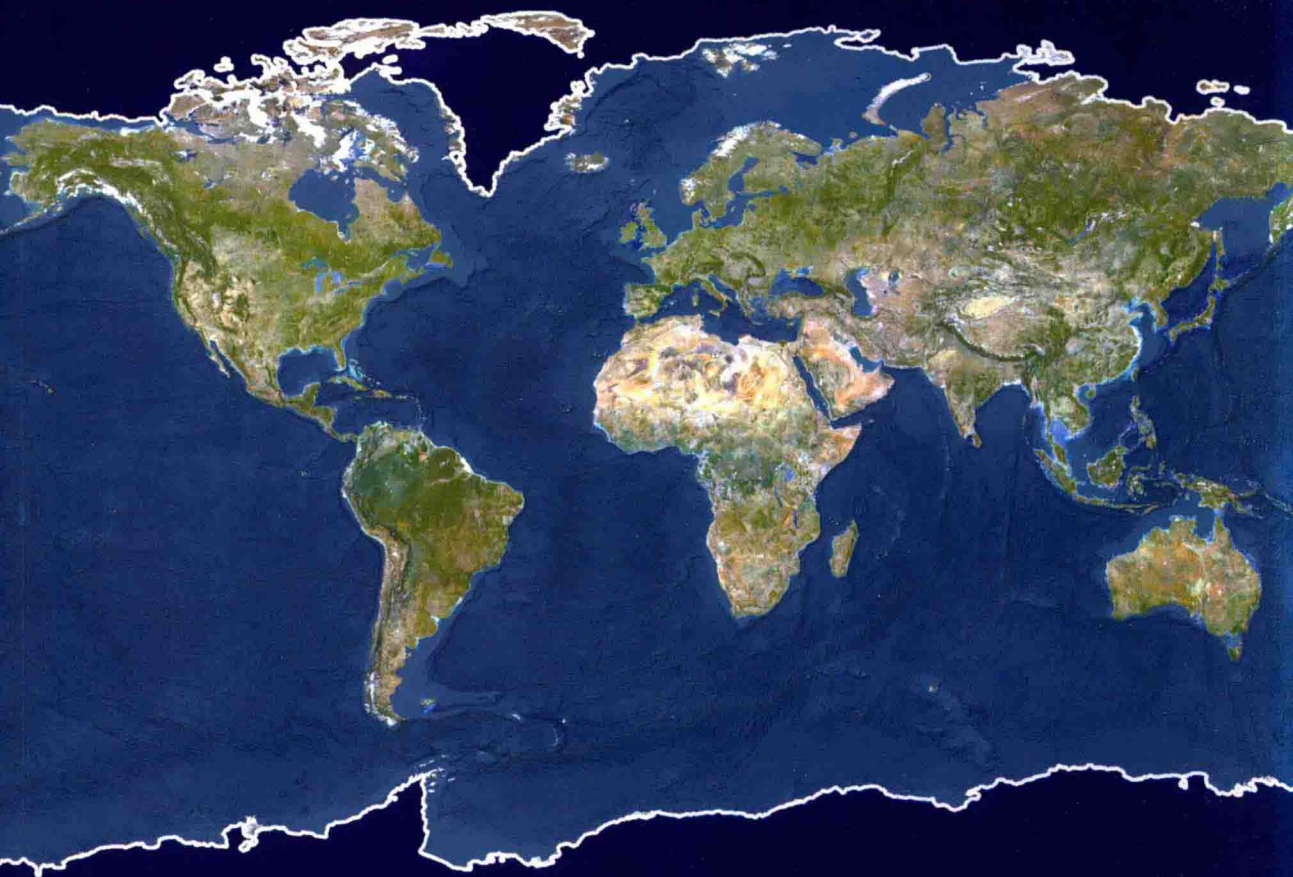




天基雷达理论与应用

Space Based Radar:

Applications

S. Unnikrishna Pillai

【美】Ke Yong Li 著

Braham Himed

邓云凯 等译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

空间射频信息获取新技术丛书

天基雷达理论与应用

Space Based Radar

Theory and Applications

S. Unnikrishna Pillai

[美] Ke Yong Li 著

Braham Himed

邓云凯 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书对天基雷达的原理、设计方法及应用进行了全面的讲解。在详细介绍天基雷达运动学(包括二体问题和开普勒定律、雷达-地球几何关系、擦地入射角、主波束覆盖、距离模糊现象、地球自转引起的多普勒频移及偏航角推导等)的基础上,重点论述了天基雷达平台下杂波和目标数据的产生,以及基于空时自适应处理技术进行杂波抑制和目标检测的方法,并深入分析了多传感器、多脉冲环境下多参数估计的 Cramer-Rao 界。同时,提出了噪声环境下,联合发射机和接收机的波形分集设计及信号处理方法。

本书具有很强的实用性和易读性,适合从事天基雷达研究的技术人员作为参考书,也适合作为相关专业的研究生教材。

S. Unnikrishna Pillai, Ke Yong Li, Braham Himed; Space Based Radar; Theory and Applications
9780071497565

Copyright © 2008 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2016 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。本授权中文简体字翻译版由麦格劳希爾(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权 © 2016 由麦格劳希爾(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2010-1366

图书在版编目(CIP)数据

天基雷达理论与应用/(美)皮莱(Pillai, S. U.)等著;邓云凯等译. —北京:电子工业出版社,2016.4
(空间射频信息获取新技术丛书)

书名原文:Space Based Radar: Theory and Applications

ISBN 978-7-121-27765-8

I. ①天… II. ①皮… ②邓… III. ①卫星载雷达-研究 IV. ①TN959.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 294626 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:李秦华

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787 × 1092 1/16 印张:19 字数:536.3 千字

版 次:2016 年 4 月第 1 版

印 次:2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价:69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

“空间射频信息获取新技术丛书”编委会

主 任：左群声

副 主 任：周万幸 敖 然

委 员：（以下按姓氏音序排列）

保 铮	贲 德	陈 涛	范义晨	郭 庆	韩宗杰
胡明春	黄培康	金 林	李 斌	李大圣	刘炳奇
刘宏伟	刘华军	刘明罡	罗 敏	马 林	潘宇虎
孙 俊	汪文英	王建民	王小谟	吴鸣亚	夏琛海
余振坤	张光义	张金平	张荣涛	赵玉洁	周志鹏

编委会秘书长：刘宪兰 陈 玲

主 编：王小谟 张光义



总序 Foreword

我国的雷达事业,经过数十年几代人的努力,从无到有,从小到大,从弱到强,在许多领域已经进入了国际先进行列。为了总结这些经验,给今后的雷达发展打好基础,前些年,我们在众多雷达专家、学者的支持和参与下,在总结长期雷达科研、生产、教学、使用经验的基础上,聚集体智慧,组织了“雷达技术丛书”的编写工作。该套丛书一经电子工业出版社隆重推出,便受到业内同行的热烈欢迎,也成为我国雷达界的一项重要科研成果。

转眼,距“雷达技术丛书”的出版已近十年,在我国国防建设与经济建设需求的推动下,在电子信息技术高速发展的基础上,雷达及雷达相关技术又有了新的进步。近年来,我国在相控阵天线及其发射接收组件技术方面取得了很大进步,并推广应用于各种对空目标监视雷达及各类机载雷达;开展了高分辨率多维雷达信息获取前沿技术研究,实现了机载与星载高分辨率合成孔径雷达(SAR)成像和超宽带雷达成像,这些都在国防建设和各个民用领域发挥着重要作用。在天线、微波、信号处理、数据处理等雷达基础技术快速发展的同时,与通信、网络技术的快速发展相同步,我国在雷达组网、雷达数据整合等雷达系统技术方面也取得了骄人的进步,使得雷达成为空间射频信息获取的重要工具。特别值得一提的是,为适应航空、航天和空间应用的需要,我国在用于空间目标探测、跟踪和精密测量的大型单脉冲雷达与相控阵雷达技术方面获得了新的进展,其中相当部分拥有发明专利与自主知识产权。与此同时,在推动我国雷达技术进步的队伍中也涌现出不少优秀的年轻专家。在总结近几年雷达及雷达系统技术快速发展的基础上,为满足雷达信息获取的新要求,包括地基雷达对高速、高机动飞行目标及机载与星载雷达对地面、海面乃至地下目标获取信息的要求,我们再次组织编写了“空间射频信息获取新技术丛书”(以下简称丛书)。该套丛书的正式出版和推广,将有利于正确把握雷达技术发展方向,促进我国雷达事业的创新发展。

为使丛书较系统地总结和反映我国在空间射频信息获取与应用方面所取得的创新技术与理论成果,同时吸纳国外在该领域的相关前沿基础科研成果,为该领域技术发展提供借鉴作用,本套丛书除包括本版内容之外,还充实了国外引进版内容。全套丛书的内容定位主要突出空间射频信息获取技术的工程设计性,反映空间射频信息获取的新技术。在本版内容中,强调总结我国科技人员近年来在空间射频信息获取技术领域取得的重大科技成果和突破性进展,框架设想上体现新技术和创新发展;在国外引进版内容上,重点吸纳国

外空间射频信息获取技术领域的前沿基础科学研究和对该领域技术发展具有借鉴作用的新技术。全套丛书尽可能提供有关研究图表、数据、曲线和计算公式，使设计举例更具有实用性。

丛书的编写创作主要由领域内几位院士和众多中青年专家担纲，他们既要完成繁重的科研和管理任务，又要抓紧时间撰写书稿，工作十分辛苦，在此，我们谨代表丛书编委会，向各册作者和审稿专家表示深深的敬意！我们希望本套丛书所展示的新技术、新成果和新理论等能对从事该技术领域科研、设计、教学、管理工作的人员，部队干部、战士，以及高等学校相关专业的学生、研究生有所帮助，从而促进我国空间射频信息获取技术的发展，为国家信息化建设和国民经济建设作出贡献。

本套丛书的出版，得到了中国电子科技集团公司、中国电子科学研究院、南京电子技术研究所、西安电子科技大学等各参与单位的大力支持，得到了电子工业出版社领导和刘宪兰首席策划编辑的积极推动，得到了参与丛书工作全体同志的热情帮助，在此一并表示衷心的感谢！

丛书主编、中国工程院院士

王小谟 张光义

2013年5月

译者序

天基雷达以航天器为载体平台,大致分为三类,(1)空间交会对接雷达;(2)资源遥感雷达,如合成孔径雷达(SAR)、散射计、高度计等,用以获得地物图像、散射特性和高度等遥感信息;(3)天基预警监视雷达,用来检测地面和空中运动目标。其中前两类已经实现,而第三类由于技术难度、系统复杂性和成本等原因,目前还没有在太空中部署。天基雷达采用居高临下的俯视工作方式,可全天时、全天候、大范围、远距离发现目标,具有地基和空基雷达不具备的优势,是雷达进入太空时代的必然发展。但天基雷达受航天器平台体积、质量、功耗的约束,以及轨道动力学、观测体制和造价成本因素的影响,其设计复杂,研制难度大,具有极大技术挑战性,亟须全面系统的理论来支撑研究工作。

该书的三位作者分别来自美国纽约布鲁克林理工大学、C&P 技术公司和美国空军实验室,长期从事雷达信号处理研究工作,具有深厚的理论功底和丰富的工程经验。本书比较全面地讲解了天基雷达的相关理论知识,首先对轨道动力学形成的二次曲线进行分析总结,接着系统研究了天基雷达的几何关系、主波束足印、距离模糊、杂波模型和杂波谱,在此基础上,重点研究了空时自适应处理(STAP)算法及其在地面动目标指示(GMTI)和空中动目标指示(AMTI)中的应用。本书还探讨了发射接波形分集,以及轨道动力学中的三体问题,后者对于未来工作于空间站和深空探测平台的雷达具有重要意义。

为了阐述天基雷达理论,本书应用了大量数学推导建立各种关系,涉及矩阵论、球面几何学、曲线方程、概率随机过程等,给阅读和理解带来一定的难度,但通过深入细致学习,读者从中必能获益匪浅。希望本书能成为研究天基雷达专业人士的重要参考书籍。

本书的译者来自中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部,长期从事星载/机载雷达系统设计和研制工作,曾参与我国多型合成孔径雷达系统的研发。

本书译者结合在星载雷达领域的研究经验,认真阅读理解了本书的英文原著,完成了全书的翻译工作。全书共8章,由邓云凯、禹卫东主译。陆萍萍、王朔、祁丽娟、王春乐等参加翻译,李红霞对翻译稿进行了整理。本书的翻译工作还得到中国科学院电子学研究所多位专家的支持。

由于本书涉及专业面广,内容深入,语言风格多变,我们对原著内的理解难免有不到之处,敬请各位同行和专家批评指正。

前 言

本书主要对象为大学高年级学生或研究生,以及具有雷达基础知识的工程师。材料的组织使其能够在一个学期的课程中完成。概率论和随机过程的基础背景有助于对本书中统计学方面的理解。为了对信号处理部分有所帮助,本书包含了传感阵列处理和空时自适应处理(STAP)的介绍章节。其他一些教师所需要的诸如讲义、课后作业及解答的材料可以在课程网站上获得(访问:www.mhprofessional.com 可获得更多细节)。

所有天体和人造卫星在空间的运动都受牛顿万有引力定律的制约。在二体情况下,就形成了各种二次曲线轨道,如圆、椭圆、抛物线和双曲线。在第2章和第3章中,介绍了各种二次曲线,用开普勒定律形式给出它们与牛顿引力定理间的关系。

第4章介绍了天基雷达的动力学,包括雷达-地球间的几何关系,掠地角,距离和地面上的波束脚印,距离模糊现象,地球自转引起的多普勒频移,以及由此引起的倾斜角推导。地球非球面效应对掠地角的影响、局部经纬度下的距离函数等相关问题在附录中考虑。

第5章介绍了阵列信号处理和STAP,对接收处理的一些基本方法进行了详细讨论。这里列举的只是表明STAP的优势,远没有穷尽。

第6章详细给出了天基雷达杂波模型和目标检测性能评估的明细。对影响杂波数据的各种因素进行了讨论,诸如距离模糊效应、地球自转的倾斜角现象、风和地形效应。针对不同情况,这些因素对各种STAP算法在杂波抑制和目标检测上的影响,做了定量化和说明。为了有助于理解地形模型,本书采用了NASA Terra卫星获得的地图,该地图把地球真实表面按每 1 km^2 的小块分为16种陆地类型——森林、城市、湖泊等。这些小块的平均雷达后向散射面积(RCS)数值被用来模拟单独的随机散射回波。为了更高的保真度,还考虑了RCS随掠地角变化的影响。在风效应的模拟中,把其作为一个低阶平稳ARMA过程模型,该过程依赖于载频、风速和雷达脉冲重复频率(PRF)。还给出了风效应对算法性能影响的有趣分析。

第7章对机载和天基雷达在多传感器、多脉冲环境中的性能,用Cramer-Rao界进行了分析,涉及两种未知参数——目标方位和功率电平。

第8章介绍了发射接收联合波形分集。众所周知,对于某个给定的发射波形,以及目标(通道)响应和噪声场景,传统的匹配滤波器可以得到最优接收机性能。本章研究了发射机优化问题,在特定情况下,如特定目标和干扰/噪声情形,通过发射特定的波形,可以获得潜在的优势。

第9章进一步考虑有趣的话题,诸如在空间寻找合适的位置部署未来的空间站、近地小行星跟踪天基雷达。这里,考察了一种特殊的三体问题及其稳定解:一个极小物体在两个有限旋转体影响下的运动。这些稳定解用众所周知的情形进行了举例说明,如木星附近的特洛伊小行星,以及处于地球与太阳之间,靠近地球一侧的Gegenschein光带。其中一

些稳定解可能与人造任务一样令人感兴趣，如太阳-地球或地球-月亮系统。从长远看，我们的最终生存依赖于深空雷达对于近地天体的发现和跟踪的警戒能力，如小行星、彗星，并最终改变其轨道以避免与地球相撞。

作者要趁此机会感谢 AFRL 的 Peter 博士、林肯实验室的 James Ward 博士对手稿的审阅。他们的反馈对于改进本书的质量非常有用。Peter 从一开始就是我们的热心支持者，很感谢他就各专题所做的技术讨论，以及帮助我们通过 AFRL 内部各层面的公开发布。这里也要感谢 AFRL 雷达信号处理分部的 Paul Gilgallon 先生，William Baldygo 主管的努力。要特别感谢 Mark Davis 博士、Joseph Guerci 博士、Michael Wicks 博士、S. Radhakrishnan Pillai 博士、Stephen Mangiat 博士的有益反馈和评论。作者还要进一步感谢 Gerard Genello 先生、Yuhong Zhang 先生、Abdelhak Hajjari 先生和 Lawrence Adzima 先生的支持和鼓励。最后，AFRL 的幻想家们在提出广阔技术项目上的远见和始终如一的执行力值得赞扬。

McGraw-Hill 团队高效协调的工作和本书出版过程中自始至终的指导值得特别赞扬，包括工程部编辑主任 Wendy Rinaldi 女士、协调员 Mandy Canales 女士，项目经理 Harleen Chopra 女士。Rinaldi 高效的管理风格使整个过程对我们轻松自如，我们要同样感谢她。

最后，第一作者要趁此机会表达对他在纽约布鲁克林理工大学的导师 Dante Youla 教授的深深谢意，他是一位真正在多方面激发作者灵感的人。为了表达谢意，John Bunyan 的一段话正合适：

你一直是那么热心指导我们

我们永远不会忘记你对我们的恩惠……

S. Unnikrishna Pillai

Ke Yong Li

Braham Himed

缩 写 词

AMTI	Air Moving Target Indication	空中动目标指示
AR	Auto Regressive	自回归
ARMA	Auto Regressive Moving Average	自回归滑动平均
CMT	Covariance Matrix Tapering	协方差矩阵锥削
CNR	Clutter to Noise Ratio	杂噪比
CR	Cramer-Rao	Cramer-Rao 界
DFT	Discrete Fourier Transform	离散傅里叶变换
EC	Eigen Cancellor	特征值对消器
ECSASPFb	Eigen Cancellor with Subarray-Subpulse and Forward-Backward smoothing(EC-SASP-FB)	子阵-子脉冲与前后向平滑的特征值对消器
EFA	Extended Factored Time-Space Approach	扩展分解时空方法
FTS	Factored Time-Space Approach	分解时空方法
GMTI	Ground Moving Target Indication	地面动目标指示
HTP	Hung-Turner Projection	投影
HTPSASPFb	Hung-Turner Projection with Subarray-Subpulse and Forward-Backward smoothing(HTP-SASP-FB)	子阵-子脉冲前后向平滑 Hung-Turner 投影
i. i. d.	Independent and Identically Distributed	独立同分布
JDL	Joint Domain Localized approach	局域联合方法
MDV	Minimum Detectable Velocity	最小可检测速度
MF	Matched Filter	匹配滤波器
ML	Maximum Likelihood	最大似然
PRF	Pulse Repetition Frequency	脉冲重复频率
PRI	Pulse Repetition Interval	脉冲重复间隔
RCS	Radar Cross Section	雷达截面积
SAR	Synthetic Aperture Radar	合成孔径雷达
SBR	Space Based Radar	天基雷达
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	信号与干扰 + 噪声之比
SMI	Sample Matrix Inversion	采样矩阵求逆法
SMIDL	Sample Matrix Inversion with Diagonal Loading	对角加载采样矩阵求逆法
SMIDLSASPFb	Sample Matrix Inversion with Diagonal Loading, Subarray-Subpulse and Forward-Backward smoothing(SMIDL-SASP-FB)	对角加载、子阵-子脉冲和前后向平滑的采样矩阵求逆法
SMIPROJ	Sample Matrix Inversion with Convex Projection	凸映射采样矩阵求逆法

SMISASPFB	Sample Matrix Inversion with Subarray-Subpulse and Forward-Backward smoothing(SMI-SASP-FB)	子阵-子脉冲和前后向平滑的采样矩阵求逆法
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
STAP	Space-Time Adaptive Processing	空时自适应处理
SVD	Singular Value Decomposition	奇异值分解
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	无人机

目 录

第1章 引言	1
1.1 概述	2
1.2 雷达方程	4
1.3 符号表示和矩阵等式	5
1.3.1 特征值和特征向量	6
1.3.2 Hermite 矩阵	8
1.3.3 奇异值分解(SVD)	10
1.3.4 Schur, Kronecker 和 Khatri-Rao 积	12
1.3.5 矩阵求逆引理	17
附录 1-A 线谱和奇异方差矩阵	18
参考文献	20
第2章 二次曲线	22
2.1 什么是二次曲线	22
2.1.1 椭圆	23
2.1.2 抛物线	27
2.1.3 双曲线	28
2.2 太阳系	30
附录 2-A 球面三角形	31
参考文献	34
第3章 二体运动和开普勒定律	35
3.1 轨道动力学	35
3.1.1 质心的运动	36
3.1.2 相对运动方程	37
3.2 开普勒定律	39
3.3 同步轨道和极轨道	41
3.4 卫星速度	42
附录 3-A 开普勒方程	46
附录 3-B 欧拉方程和彗星的确认	48
附录 3-C 椭圆轨道的兰勃特方程	51
参考文献	52
第4章 天基雷达——运动模型/动力学	53
4.1 雷达-地球几何关系	53

4.2 最大距离 56

4.3 主波束足印尺寸 57

4.4 主波束足印集 59

4.5 距离混叠现象 62

 4.5.1 主波束混叠 62

 4.5.2 总的距离混叠 65

4.6 多普勒频移 67

4.7 偏航角和偏航幅度：考虑地球自转的天基雷达模型 69

附录 4-A 经纬度坐标系下的地距计算 82

附录 4-B 非正球体模型下的掠射角修正因子 84

附录 4-C 多普勒效应 89

附录 4-D 椭球地球和偏航角校正 91

参考文献 94

第 5 章 空时自适应处理 95

 5.1 空间阵列处理 95

 5.1.1 为什么使用阵列 95

 5.1.2 最大化输出 SNR 101

 5.2 空时自适应处理 104

 5.3 侧视机载雷达 106

 5.3.1 最小可检测速度(MDV) 111

 5.3.2 采样矩阵求逆(SMI) 112

 5.3.3 对角加载的采样矩阵(Sample Matrix with Diagonal Loading, SMIDL) 113

 5.4 基于特征值结构的 STAP 113

 5.4.1 Brennan 准则 114

 5.4.2 特征对消法(Eigencanceler Methods, EC) 114

 5.4.3 Hung-Turner 投影(HTP) 118

 5.5 子孔径平滑方法 119

 5.6 用于 STAP 的子孔径平滑方法 126

 5.6.1 子阵列方法 126

 5.6.2 子脉冲法 126

 5.6.3 子阵列-子脉冲法 127

 5.7 阵列锥削和协方差矩阵锥削 129

 5.8 凸映射技术 134

 5.8.1 凸集 135

 5.8.2 Toeplitz 性质 135

 5.8.3 正定特性 136

 5.8.4 交替投影方法 137

 5.8.5 松弛映射算子 138

5.9	FTS 算法	139
5.10	局域联合法(JDL)	142
附录 5-A	等距阵列旁瓣电平	144
	参考文献	148
第 6 章	SBR 平台的 STAP 算法	149
6.1	SBR 数据模型	149
6.1.1	主瓣和旁瓣杂波	151
6.1.2	理想杂波谱	155
6.2	最小可检测速度(MDV)	160
6.3	存在地球自转和距离混叠时的 MDV	162
6.4	正交脉冲法最小化距离混叠	170
6.5	散射回波模型	176
6.5.1	地形模型	177
6.5.2	ICM 模型	180
6.6	地形模型和风浪影响下的 MDV	185
6.6.1	风浪对多普勒频率的影响	187
6.6.2	风浪对多普勒频率的衰减效应的一般理论	190
6.7	地形、风浪、距离混叠和地球自转对性能的联合影响	194
6.8	适应于 SBR 的 STAP 算法	196
附录 6-A	矩阵求逆恒等式	205
附录 6-B	输出 SINR 的推导	206
附录 6-C	谱因子分解	207
附录 6-D	有理系统的表示	211
	参考文献	214
第 7 章	采用 Cramer-Rao 界的性能分析	215
7.1	多参数情况下的 Cramer-Rao 界	215
7.2	机载和天基雷达情况下目标多普勒和功率的 Cramer-Rao 界	223
7.3	仿真结果	231
	参考文献	237
第 8 章	波形分集	238
8.1	匹配滤波接收机	240
8.1.1	白噪声匹配接收机	241
8.1.2	色噪声匹配接收机	245
8.2	线性调频信号和脉冲压缩 ^[3]	249
8.3	噪声下的发射-接收联合设计	252
8.4	时宽带宽联合优化	259

附录 8-A 线性调频信号的变换	265
参考文献	269
第 9 章 高级专题	270
9.1 一个小体围绕两个有限体问题	270
9.1.1 三体问题的特解	275
9.1.2 特解的稳定性	278
9.1.3 线性解的稳定性	280
9.1.4 等边解的稳定性	283
附录 9-A Hill 球	286
参考文献	288

第1章 引言

人造卫星和行星、彗星等天体在空间的运动,主要受中心引力的约束。对于行星,太阳施加中心引力;对于卫星,地球发挥中心引力角色。

中心引力就是牛顿的重力平方反比定律(原理,1687)。对于两体运动,这种力的一个有趣特点就是形成平面轨道,包括圆、椭圆、抛物线和双曲线,都属于广义二次曲线。多数卫星沿着近圆轨道围绕地球运动。根据开普勒(1571-1630),地球和太阳系中的其他行星沿椭圆轨道围绕太阳运动,太阳作为椭圆的一个焦点,就像月亮围绕地球运动一样,尽管地球和月亮的轨道是近圆的。当把太空飞船从一个轨道转移到另一个轨道时,进而在星际旅行中逃脱中心引力时,就要用到抛物线轨道。为了快速实现这个目标,抛物线轨道更有效率。

天基雷达(SBR)一旦发射进入轨道,就围绕地球运动,同时地球还围绕着地轴自转。天基雷达利用自身位置的优势,可以覆盖地球上很大的区域,获取情报、侦查、监视地面运动目标。通过调整SBR的速度和轨道参数,有可能定期扫描地球上各个部分,收集数据。基于SBR的侦查系统可以遥控,只需要很少的人工干预。系统响应时间快,提供信息准确。因此,感兴趣目标可以被更加精细地确认和跟踪,可以得到高分辨率图像^[1]。

SBR任务的目的随特定应用而变化,如地面/空中运动目标指示(GMTI/AMTI),或者用合成孔径雷达成像(SAR)。总体来说,需求是近连续的全球覆盖和近实时的任务执行,同时还有一些技术挑战,包括能否负担得起、星座的规模和花费、接收处理器的干扰对消能力。

对于地球资源监视、洪水等自然灾害的缓解、地震活动监视、边境国土安全,广域侦查系统非常重要。广域监视系统提供尽可能宽的可视区域,并根据感兴趣目标的机动性和特点,具有相应的重访时间。目标特征包括快速空中飞行器、叶簇下隐藏的慢速和静止结构体。历史上,有人机侦查平台已在战场上进行过空中飞行器探测、地面车辆成像和运动目标检测,如联合侦查目标攻击雷达系统(Joint STARS)。尽管这样,对于用天基能力扩展这些系统的需求最近一直在增长。

SBR系统已经被考虑几年了,只有SAR模式已具备商业可行性。这是由于空间部件技术的有限可获得性,以及制造庞大空间系统的高额花费。最近几个技术项目已有希望在可负担阵列天线雷达设计上取得显著进展。尽管这样,这些雷达设计所需的孔径和平均功率仍将大大超出以前所考虑的情形。这些系统能同时提供广域侦查和空中地面运动目标跟踪。这种能力特别有吸引力,因为它可以提供机载系统无法接近区域的纵深覆盖,很容易、很灵活地部署传感器平台,满足覆盖任务和广域覆盖率性能,以及叶簇穿透(FOPEN)所需的垂直下视能力^[2]。

在SBR系统设计中必须考虑几个因素,包括感兴趣的区域、搜索空间的重访率、模式

调度(其他模式所需的时间安排会影响区域覆盖率)、地形遮挡造成的目标阻碍、叶簇和其他干扰效应,以及最小可检测速度(MDV)。区域覆盖的主要驱动力是雷达平台高度和雷达传感器的视场。图 1.1 显示了采用 500 km 高度的 SBR 平台所获得的地面距离覆盖,与高度 10 km 的机载平台进行了对比^[2]。

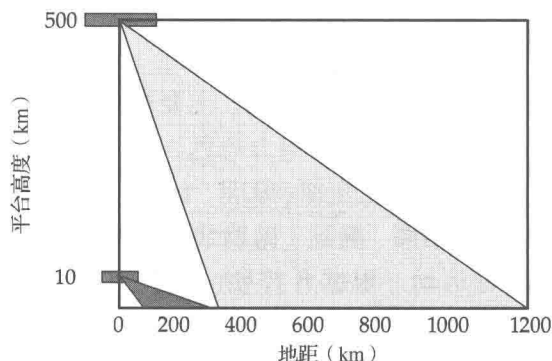


图 1.1 机载和 SBR 平台的地面覆盖对比

天基侦察需要的区域覆盖率为几百 km^2/s , 重访时间为 1~2 min, 当跟踪时需要更短的重访时间。几个研究表明, 需要用卫星星座来满足这些要求。卫星高度看上去似乎可以自由选取, 但两个范艾仑辐射带限制了实际轨道的选择。两个范艾仑辐射带以地球地理磁轴为中心, 高度从 1500~5000 km 和 13 000~20 000 km。为了最大限度减小辐射对电子部件的损害, 卫星不得不放置到这两个带之外的轨道上。因此, 所希望的轨道或者是 5000~13 000 km 的中轨道(MEO), 或者是高度小于 1500 km 的低轨道(LEO)。当今, 在 SBR 实施中, LEO 和 MEO 都被考虑在内。但本书重点考虑 LEO 模式^[3]。

机载和天基情况还有另一个主要差别, 其产生是由于非地球同步空间传感器看到的为一个转动着的地球。对于机载几何关系, 传感器平台和侦查区域本质上是同时转动的, 因此等效于地球是静止和非转动的。但对于 SBR 的运行, 存在随距离变化的杂波距离-多普勒响应, 使杂波抑制成为一个困难的任务, 这又导致对自适应技术的限制, 如空时自适应处理(STAP)算法。

1.1 概述

SBR 系统可分为三个主要类型: 地球观测雷达、行星雷达和国防雷达。Seasat(1978)、RadarSat-1(1995)和 RadarSat-2(2007)、航天飞机成像雷达(SIR-A/B/C)(1981-1994)、欧洲遥感卫星(ERS-1 和 ERS-2)是其中一些地球遥感雷达。喷气推进实验室(JPL)地球科学计划包括用于海洋科学的 Seasat(1978)、用于陆地成像的 SIR-A/B/C、用于全球和地形学的航天飞机地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)、1992 年的地形测量试验(TOPography EXperiment, TOPEX)、Jason-1(2001)和 Jason-2(2008)、1996-1997 年间用于海洋形态测量和宽副数据采集的 NASA 散射计(NASA SCATterometry, NSCAT)^{[4][5][6]}。

Seasat 是第一个设计为海洋遥感的地球轨道卫星, 装载了第一个空间 SAR。它的设计