



航天科技图书出版基金资助出版

双基地雷达：一项新兴技术

Bistatic Radar: Emerging Technology

[英] 米哈伊尔·切尔尼亚科夫 (Mikhail Cherniakov) 编

陈筠力 译

WILEY



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

WILEY

双基地雷达：一项新兴技术

Bistatic Radar: Emerging Technology

[英] 米哈伊尔·切尔尼亚科夫 (Mikhail Cherniakov) 编

陈筠力 译



中国宇航出版社

· 北 京 ·

Translation from the English language edition:
Bistatic Radar; Emerging Technology by Mikhail Cherniakov
Copyright © 2008, by John Wiley & Sons Ltd.

Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Astronautic Publishing House and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited. All Rights Reserved.

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号: 图字: 01-2015-0168 号

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

双基地雷达: 一项新兴技术 / (英) 切尔尼亚科夫
(Cherniakov, M.) 编; 陈筠力译. --北京: 中国宇航出版社, 2015. 7

书名原文: Bistatic radar; emerging technology

ISBN 978-7-5159-0973-8

I. ①双… II. ①切… ②陈… III. ①双基地雷达-研究 IV. ①TN959

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 160395 号

责任编辑 彭晨光

责任校对 祝延萍

封面设计 文道思

出版
发行 **中国宇航出版社**

社址 北京市阜成路 8 号
(010)60286808

邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888
(010)60286887

(010)68371900
(010)60286804(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2015 年 7 月第 1 版

2015 年 7 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 16.25 彩插 12 面

字数 440 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0973-8

定价 128.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

作 者

安东尼奥·默西亚 (Antonio Moccia)

马科·德·埃里克 (Marco D'Errico)

艾伯托·莫雷拉 (Alberto Moreira)

格哈德·克里格 (Gerhard Krieger)

帕斯卡尔·杜波依斯-费尔南德斯 (Pascale Dubois - Fernandez)

休伯特·坎塔洛伯 (Hubert Cantalloube)

伯纳德·韦赞 (Bernard Vaizan)

米哈伊尔·切尔尼亚科夫 (Mikhail Cherniakov)

曾涛 (Tao Zeng)

保罗·豪兰 (Paul Howland)

休·格里菲思 (Hugh Griffiths)

克里斯·贝克 (Chris Baker)

约翰·萨 (John Sahr)

前 言

《双基地雷达：一项新兴技术》是一本深入研究双基地雷达的专著。围绕双基地雷达这一课题，科研人员开展了大量的研究工作，但是目前尚未形成一套公认的成熟理论。本文主要探讨两个主题：双基地合成孔径雷达（BSAR）和无源双基地雷达系统（PBRS）。

本书是继已出版的由米哈伊尔·切尔尼亚科夫（Mikhail Cherniakov）主编的《双基地雷达：原理与实践》之后推出的又一部著作。《双基地雷达：原理与实践》探讨的是双基地雷达已有的且最新有所进展的问题，可帮助读者对双基地雷达技术有更深入的了解。该书的开始部分带有“教学风格”，专门讲述雷达技术的基本原理；第二部分讲述双基地雷达的基础知识，着重介绍双基地雷达反射方面的最新成果；最后部分则论述所采用的系统性方法，以及将前向散射雷达用于探测和跟踪空中目标的实际应用。

《双基地雷达：一项新兴技术》包含两部分。第一部分重点介绍双基地合成孔径雷达的各个不同方面，在当今有关双基地雷达的研究中，双基地合成孔径雷达是其中最新也是发展最快的一项技术。我们用 IEEE Explorer 搜索引擎进行搜索后发现，1996—1997 年间，只发表了一篇与双基地合成孔径雷达有直接关系的论文。1998—1999 年有两篇论文发表，2002—2003 年发表了 20 篇论文。不过，从 2006 年初到 2007 年 3 月这段时间，共有 34 篇论文发表，看来对于这一课题的关注度有了很大提高。

本书第一部分专述双基地合成孔径雷达，分为三方面来反映双基地合成孔径雷达的主要拓扑结构：星载双基地合成孔径雷达，机

载双基地合成孔径雷达，以及天一地双基地合成孔径雷达。前两类双基地合成孔径雷达对读者来说很容易理解；星载双基地合成孔径雷达要求至少在 2 个航天器上分别安装发射机和接收机，而机载双基地合成孔径雷达要求在不同的飞机上安装发射机和接收机。目前的大部分研究及后续研究主要为这两个方向。第三类讲的是天一地双基地合成孔径雷达，它实际上是一种非对称结构，即发射机装在航天器上，接收机可以安装在飞机上、地面车辆上或是处于静止状态，比如固定在地面上。对于双基地合成孔径雷达来说，天一地双基地合成孔径雷达是新加入的内容，前景并不明朗。目前，各国的许多研究团队都在研究这一课题，但就研究深度而言，都不如前两类双基地合成孔径雷达。或许有人会认为，现在就推出一本介绍天一地双基地合成孔径雷达的图书还为时过早，但我们只是希望能为有需要的读者及时提供些许帮助。

本书第二部分论述的是无源双基地雷达系统。其发展历史与双基地合成孔径雷达相比较长，几乎在双基地雷达之初就有研究，而现在这一课题又重新成为人们深入研究的对象。熟知双基地雷达的读者可能会看到以其他名称出现的无源双基地雷达系统，比如无源相干定位，基于机会发射的双基地雷达，基于非合作发射机的双基地雷达等。人们再次关注这一课题有几方面的原因。一方面是在无源双基地雷达系统发展的早期阶段，只有地面电视和无线电广播系统可能被作为非合作发射机，时至今日可供选择的无线系统已大大增加，它们不仅能 24 小时连续运行，而且可以覆盖整个地球：卫星和地面数字视频与音频广播，卫星和地面移动通信系统，全球定位系统，星载雷达，无线局域网以及许多其他应用。另一方面，尽管无线系统不断出现，但人们所采用的频谱（至少就毫米波长而言）已经超载了，要为新的系统申请频率会很困难。鉴于这些原因以及其他方面的原因，本书会在适当的部分展开广泛的讨论。

共有 12 位一流的专家参与了本书的筹备工作，他们来自美国、中国及欧洲各国，分别代表着各自不同的研究学派。我不仅要感谢

他们为这一项目所付出的时间、精力和努力，还要感谢他们为我提供的宝贵建议和专业价值极高的参考资料。

在本书筹备期间，本人参与了一项由英国电磁遥感防务技术中心发起并提供资金的研究项目。该机构云集了来自英国业界（SEL-EX 传感器及机载系统有限公司，THALES，DSTL，BAE 系统等）的顶尖雷达专家。在此向所有这些专家致谢，正是他们的大力支持才使我得以顺利完成此书的编纂工作。

米哈伊尔·切尔尼亚科夫

Mikhail Cherniakov

目 录

第 1 章 双基地合成孔径雷达基本原理	1
1.1 引言	1
1.2 双基地合成孔径雷达的基本几何构形和分辨率	3
1.3 双基地合成孔径雷达的科学应用	10
1.3.1 通过多角双基地合成孔径雷达观察评估天然及 人造目标的双基地雷达截面积	10
1.3.2 用距离和双基地散射特性测量值获取地形高程 及坡度	11
1.3.3 由两部雷达的多普勒频率求取速度	11
1.3.4 天线间距加大在立体雷达测量学中的应用	12
1.3.5 提升图像分类及模式识别程序	12
1.3.6 海洋波频谱分量的高分辨率测量	13
1.3.7 双基地合成孔径雷达数据处理	14
1.3.8 位置与速度测量	15
1.3.9 双基地雷达立体测量	19
1.4 结束语	24
缩写	26
参考文献	28
第 2 章 星载双基地合成孔径雷达	36
2.1 引言	36

2.2 星载双基地合成孔径雷达设计要点	39
2.2.1 星载双基地合成孔径雷达构形的基本权衡研究	39
2.2.2 双基地观测对任务和系统设计的影响	44
2.2.3 有效载荷—平台性能权衡研究	47
2.2.4 双基地合成孔径雷达任务在功能和技术方面的 要点	54
2.3 星载双基地合成孔径雷达任务分析	58
2.3.1 星载双基地合成孔径雷达轨道设计	58
2.3.2 星载双基地合成孔径雷达姿态与天线指向设计	68
2.4 结束语	80
缩写	81
参考文献	84
第3章 对地观测用的双基地合成孔径雷达	91
3.1 引言	91
3.2 双基地卫星的科学依据及技术手段	93
3.3 双基地有效载荷的主要特性及结构	95
3.3.1 设计假设	95
3.3.2 系统结构	95
3.3.3 有效载荷工作模式	96
3.3.4 信号同步	98
3.3.5 科学数据处理及远程通信	100
3.3.6 天线特性	102
3.3.7 总体预算	103
3.4 轨道设计	104
3.5 姿态设计与雷达指向设计	106
3.6 雷达性能	117

3.7 结束语	122
缩写	123
参考文献	125
第4章 星载干涉测量及多基地合成孔径雷达系统	127
4.1 引言	127
4.2 星载合成孔径雷达干涉测量	130
4.3 干涉测量任务设计	135
4.3.1 卫星编队飞行	135
4.3.2 相位与时间同步	142
4.3.3 双基地和多基地合成孔径雷达系统的工作模式	149
4.4 任务举例	154
4.4.1 TanDEM-X	154
4.4.2 半主动 TerraSAR-L “车轮”构形	169
4.5 先进的多基地合成孔径雷达系统理念	181
4.5.1 合成孔径雷达层析成像技术	181
4.5.2 抑制模糊和提高分辨率	185
4.5.3 多基地合成孔径雷达成像	190
4.5.4 沿航迹干涉测量和动目标指示	191
4.5.5 多基线变化检测	191
4.6 讨论	194
缩写	198
参考文献	202
第5章 机载双基地合成孔径雷达	217
5.1 双基地合成孔径雷达的目的	217
5.2 机载双基地合成孔径雷达构形	219
5.2.1 时不变构形	219

5.2.2 一般的双基地构形	221
5.2.3 动目标指示应用	221
5.2.4 分辨率性能举例	222
5.3 机载双基地合成孔径雷达处理特征	226
5.3.1 合成孔径雷达合成过程变化	226
5.3.2 运动补偿问题	237
5.3.3 机载双基地合成孔径雷达图像的几何失真模型	246
5.3.4 各种处理问题	251
5.4 公开文献报导的机载双基地合成孔径雷达	260
5.4.1 密歇根州双基地合成孔径雷达实验	260
5.4.2 QinetiQ 双基地合成孔径雷达实验	261
5.4.3 FGAN 双基地合成孔径雷达实验	261
5.5 ONERA - DLR 双基地机载合成孔径雷达	262
5.5.1 系统准备	262
5.5.2 实验情况	271
5.5.3 双基地图像处理	271
5.5.4 双基地图像定标	272
5.6 实验结果选择	274
5.6.1 准单基地与单基地系统之比较	274
5.7 结束语	276
缩写	277
参考文献	279
第 6 章 天一地双基地合成孔径雷达	283
6.1 系统综述	283
6.2 空间分辨率	286
6.2.1 单基地合成孔径雷达模糊函数	288
6.2.2 双基地合成孔径雷达分辨率	293
6.3 天一地双基地合成孔径雷达分辨率	299

6.3.1 天一地双基地合成孔径雷达模糊函数	299
6.4 天一地双基地合成孔径雷达分辨率实例	310
6.5 结束语	317
缩写	318
参考文献	321
第7章 无源双基地雷达系统	324
7.1 无源双基地雷达系统的发展	325
7.2 无源雷达系统的灵敏度与作用距离	330
7.2.1 双基地雷达方程	330
7.2.2 目标双基地雷达截面	332
7.2.3 接收机噪声系数	333
7.2.4 有效带宽与合成增益	334
7.2.5 性能预估	335
7.2.6 灵敏度分析结论	340
7.3 无源双基地雷达系统处理	340
7.3.1 窄带无源双基地雷达处理	340
7.3.2 宽带无源双基地雷达处理	351
7.3.3 多基地无源双基地雷达	356
7.4 波形处理	358
7.4.1 引言	358
7.4.2 距离与多普勒分辨率——“自模糊度”	360
7.4.3 距离与多普勒分辨率——“双基地与多基地 模糊度”	368
7.4.4 波形特性对设计与性能的影响	372
7.4.5 结论	374
7.5 实验与结果	375
7.5.1 实验概述	375
7.5.2 预计的系统性能	377

7.5.3	数据采集	378
7.5.4	自适应信号滤波	379
7.5.5	互相关目标探测	384
7.5.6	远程积累时间	385
7.5.7	用十进法提高效率	389
7.5.8	类调频连续波处理	391
7.5.9	恒虚警率检测	394
7.5.10	定向	394
7.5.11	点迹—点迹组合	395
7.5.12	目标状态估计	397
7.5.13	点迹—目标相连（多照射雷达）	398
7.5.14	系统性能验证	399
7.6	结束语与结论	401
缩写		402
参考文献		405

第8章 无源雷达模糊函数修正：地面数字视频

广播系统信号		410
8.1	引言	410
8.2	地面数字视频广播系统信号规范	412
8.2.1	散射导频载波	414
8.2.2	连续导频载波	414
8.2.3	传送参数信令载波	415
8.2.4	保护间隔	416
8.3	地面数字视频广播系统信号模糊函数	417
8.3.1	地面数字视频广播系统信号模型	417
8.3.2	地面数字视频广播系统信号随机分量模糊函数	419
8.4	地面数字视频广播系统信号确定性分量对信号模糊函数的影响	421
8.4.1	自相关函数 ($\omega_d = 0$)	421

8.4.2 复合包络频谱 ($\tau=0$)	421
8.4.3 地面数字视频广播系统信号模糊函数	422
8.4.4 建模结果的实验确认	422
8.5 失配信号处理	425
8.5.1 接收机限制	425
8.5.2 接收机信号预处理	427
8.5.3 导频载波均衡	430
8.5.4 导频载波滤波	432
8.6 结束语	436
缩写	437
参考文献	439
第 9 章 基于全球导航卫星系统发射机的无源双基地合成	
孔径雷达	441
9.1 全球导航卫星系统	443
9.2 功率预算分析	446
9.3 信干比分析	448
9.3.1 天线输出端的信干比	448
9.3.2 信干比改进因子分析	449
9.3.3 仿真结果	454
9.4 结果与讨论	459
9.5 天一地双基地合成孔径雷达试验研究	460
9.6 总结	464
缩写	466
参考文献	469
第 10 章 电离层研究	472
10.1 引言	472
10.2 电离层和上层大气	474
10.2.1 电离层总结构	475

10.2.2 电离层模型	480
10.2.3 微细结构——场向密度不规则结构	481
10.2.4 电波与电离层的相互作用	485
10.3 双基地无源雷达研究	490
10.3.1 用双基地雷达观测电离层	490
10.3.2 Manastsh Ridge 雷达	490
10.4 电离层研究方向	496
缩写	497
参考文献	500

第 1 章 双基地合成孔径雷达基本原理

安东尼奥·默西亚 (Antonio Moccia)

1.1 引言

双基地雷达的收发天线分置于不同的平台，并且采用的是不会被侦测到的无源接收天线，因而自早期开发阶段始，就一直广泛用于军事方面^[1.1]。近年来，掀起了双基地雷达监视用途的研究热潮，其原因在于，尽管提高单基地辐射源的隐身能力成本相对较低，但要想减少反射到其他方向上的回波仍然相当困难。

在遥感方面的用途也是本章所要探讨的主题。由于双基地的数据获取能够为我们确定表面微波散射性质提供额外的定性及定量测量结果，因此对双基地雷达构形和性能进行了研究。此外，如果发射天线是单基地的，即同时负责发射和接收，那么我们就可以将共同覆盖的区域或目标反射的单基地和双基地数据合并，从而进一步扩展应用范围。

但是，双基地观察需要两个系统协同工作，它不仅要求发射机和接收机之间具有精确的时间同步和天线指向，而且要求对天线进行独立的精确测量和控制。由于这个原因，实现双基地观察的主要方式为，参照一定大小的复杂目标的双基地散射特性，使用其中一个或同时使用两个地面固定天线，如参考文献 [1.2] 和 [1.3] 所述。关于扩展面，有研究者提出并在某些情况下成功实现了各种用途的双基地雷达。例如，参考文献 [1.1] 称在使用 X 波段时，双基地雷达截面积作为平面内和平面外散射角的函数，在乡村地区从 -23 dB 上升到了 +6 dB，而在海洋地区从 -32 dB 上升到 +10 dB。另

有研究人员通过 Loran A 发射的信号和一部位位于 280 km 外的接收机，观察到了海浪发出的双基地雷达散射信号^[1.4]，在这项应用中，双基地回波的多普勒频率图可以提供海浪谱的各向异性。一些作者还研究了将双基地雷达用于检测大气回波的气象用途^[1.5-1.8]，参考文献 [1.9] 列出了针对气象目标，如降雨、折射率扰动等的双基地雷达方程。参考文献 [1.10] 和 [1.11] 对用于地面动目标测速和识别的双基地构形做了论述。最后，值得关注的是，密歇根大学正在开发可同时测量点目标和分布目标极化响应的室内双基地雷达设备^[1.12]，而欧洲微波实验室设施中心正在进行鉴定双基地散射特性的实验^[1.3]。

近些年来，将非合作辐射源作为输入信号的双基地雷达构形的利用，被认为是双基地技术迅速发展的主要动因^[1.13-1.14]，比如，利用现有的一些专门为其他用途单独开发和使用的微波发射机 [比如 GPS（全球定位系统）或广播卫星]。由于这些非合作信号源具有信号辐射范围广和稳定性好等特点，在使用中既可靠又经济，因此这些经过充分设计和定位的无源接收机的部署问题引起了人们的极大关注。值得注意的是，在这种情况下，双基地观察的几何构形和辐射特性严格受制于照射雷达的配置和运行，因此，采集到的数据将无法满足不同用途的需要。

对于双基地合成孔径雷达（BSAR），由于需要形成合成孔径，上述的信号同步和轨迹控制问题尤为重要。参考文献 [1.15] 进行了首个利用舰载合成孔径雷达来观察波浪状况的实验，其采用了双基地几何构形，船体的运动形成了一个约 350 m 的合成孔径。参考文献 [1.16] 中首次成功实验采用的是两个机载合成孔径雷达，它们以设定的构形飞行，获取了乡村和城市地区发出的双基地散射的特别信息；但是并未对飞机或卫星获得的地表双基地测量结果，尤其是与双基地合成孔径雷达相关的内容作系统性的报道。采用合成孔径的优点已广为人们知晓，比如分辨率和图像质量参数等，因此，全球科学界和遥感用户对双基地合成孔径雷达的开发及利用的关注