



丛书

# 微波成像技术

电子工业部第十四研究所

# 微波成像技术

Bernard D. Steinberg 著  
Harish M. Subbaram

毛仁麟 译

倪晋麟 邹崇祖 校

电子工业部第十四研究所

## 内 容 简 介

由于对被探测目标的运动参数无先验知识,致使地面微波成像技术的运动补偿问题很难解决,这便是地面微波成像技术发展缓慢的重要原因。本书则系统地论述了地面微波成像技术的理论问题及其先进的实用技术。全书共分十二章,其中包括获得微波图像以及形成高分辨微波图像时所固有的各种问题,同时介绍了提高微波图像质量的各种先进技术等。

本书重点突出,内容翔实,说理清楚,实用性较强。它不仅可供微波技术、雷达、遥感、导航和电子战有关专业的工程技术人员、科研人员阅读,也可作为高等院校相关专业高年级师生和研究生的教学参考书。

## Microwave Imaging Techniques

"A Wiley-Interscience Publication", 1991 ISBN 0-471-50078-X

### 微波成像技术

Bernard D. Steinberg, Harish M. Subbaram 著

毛仁麟译 倪晋麟 邹崇祖校

责任编辑 丁斐华

\*

《SSS》丛书编辑部出版

十四研究所情报信息中心印刷

850×1168 1/32 13印张 内部书号:SSS-017

1997.3

## 序

图像是指景物在某种介质上的再现。图像按颜色可分成黑白和彩色图像,按活动程度可分成静止和活动图像;按灰度等级可分成二级和多级图像;而按所占空间维数又可分成二维平面图像和三维立体图像。可见图像是具有信息量大、运算速度快、算法严密、相关性好、集成度高、智能性强等特点的一种信息,在人类收授的信息中,图像信息所占的比重高达 60%~80%。因此,利用对形状等的识别功能,提高人们进行核对、判断、挑选等活动的能力,无论在国民经济建设中,还是在军事领域内都具有越来越重要的意义。

在第二次世界大战中,就曾利用雷达图像为飞行员轰炸敌方目标导航或发现海面上的船只,但当时主要是利用目标二维、三维距离信息显示的一幅图像即广义的雷达图像。狭义的雷达图像,如在 1972 年阿波罗—17 登月飞船飞行中宇航员用雷达获取的资料绘制的显示出环形山形状的月球表面图,标志着借助卫星、航天飞船和各种飞行器作为平台的微波遥感技术,能使人们在任何气候条件下对人类赖以生存的地球上的各个角落获取雷达图像,也表明运用合成孔径雷达所实现的遥感技术的发展超过了其它遥感技术。

由于对被探测目标的运动参数无先验知识,致使逆合成孔径雷达(ISAR)的运动补偿问题很难解决,这便是地面雷达目前仍停留在提取目标位置坐标和运动信息方面的原因;目标的物理性质,诸如形状、尺寸、材料组成等特征信息,尽管对目标态势、目标分辨和目标环

境的判定在军事指挥、控制中是极其重要的,但其技术实现则尚未趋成熟。美国宾夕法尼亚大学的 D. S 伯纳德与 M. S 哈理斯合著的《微波成像技术》一书,则系统地总结了地面微波成像的理论问题及其先进的实用技术。翻译出版这本书,将对我国正在发展中的微波成像技术的规划和研究工作起到参考和借鉴作用。

本书的前四章致力于搞清楚如何获取微波图像以及在形成高分辨力微波图像时所固有的各种问题,所涉及的课题有:物体地面微波成像的基本状况、图像质量、微波成像的数学问题、宽带效应、大波长效应和大孔径效应等。

本书的其余八章讨论提高微波图像质量的各种先进技术。其中详细探讨了:分集组合图像的实现方法,消除图像人为物体和一般图像改善(特别是净化技术)的去卷积法,大型陈列工作中至关重要的自校正方法,降低数据处理要求的方法,空间数据的超分辨力处理理论和实践,各种经实验验证的图像改善技术等。书中有大量的插图和参考文献。

在本书的整个出版过程中以及经费方面得到了电子部 14 所南京高特公司和 14 所预研部的支助。由于我们水平有限,译文不当之处在所难免,恳望读者不吝指正。

邹 崇 祖

1996. 10. 于南京

## 前 言

本书是涉及大型阵列和微波成像的一套丛书中的第三本。第一本的书名为《孔径和阵列系统设计的原理:包括随机和自适应阵列》(Wiley 书店,1976 年版),该书把通信和雷达系统的设计师们引入空间域。其目的是在天线设计师与攻读电磁学的学生以及攻读统计通信理论与系统设计的学生所实践的两个不同学科之间建立联系。在该书写成时,天线设计师一般认为其从事的工作是以无线电或雷达整机的单端口连接器为界的。整机设计师采取了类似的狭窄观点,将其任务由同一连接处开始。简言之,天线设计师处理空间问题,而整机设计师处理时间问题。天线的功能是把整个空间内同时接收到的信号变换成由天线传送给接收机的单个时变波形。接收机接到此单个时变波形并提供时间处理或滤波。这是一种简单的分工:空间滤波是天线设计师的任务,而时间滤波是整机设计师的任务。类似的工作也在传输领域分配。

当关注六十年代后期和七十年代初期出现的相控阵时,显然,系统设计应把空间与时间特性结合在一起,而不是依次处理它们。相控阵接收天线固有多端口输出。这些端口不一定要在射频上结合在一起,而输出信号作为单一时变波形传送至接收机的单端口输入亦不是必需的。多输出端口可直接传送至一个多端口接收机。于是,若取消先空间处理后时间处理这一人为的约束,则可获得更有效的信号处理。

当时,对电磁学界和雷达/通信界来说,将整个系统作为一个组合的空间时间处理机来对待是不可思议的。但是,在水下声学领域这

是很平常的,在此领域内,空间时间系统设计已使用多年。该书旨在向雷达与通信方面的研究人员介绍天线和相控阵的基本几何特性以及辐射方向图的空间特性。向他们指出,他们拥有的工具——傅里叶原理、卷积理论、线性系统理论和随机过程理论——同样是他们联系空间域内的理解所必需的基本工具。简言之,如果训练他们来处理空间域的问题,则他们只需知道一个孔径和辐射场旁瓣及电流激励等概念即可。

本书还有一个目的。宾夕法尼亚大学下设的 Valley Forge 研究中心曾把注意力集中于极高分辨力微波成像方面。由于这一事实,本书第二部分中的理论涉及实现高分辨力所必需的极大天线阵、这类阵列的各种问题以及由极大天线阵造成的辐射场的特性。讨论了稀有非周期阵列以及更加高度稀有的随机阵列,并研究了随机阵列的数学问题。此外,由于极大阵列是固有易出误差的,因此,较注意大型系统的公差理论。

第一本书为大天线阵的研究提供了知识基础;第二本书名为《大天线阵用于微波成像:无线电摄像机原理和技术》(Wiley 书店,1983 年版),是一本讨论如何实现它的书,该书叙述了大型微波的固有问题以及解决这些问题的办法。它证实,有可能制造高度失真和高度稀布的极大天线阵,并利用称作自适应波束形成的自校准方法供这类阵列产生与受衍射限制天线相同的微波成像。第二本书还进一步阐述并扩充了随机阵列的特性,同时研究了旨在降低其高旁瓣含量而应用于随机天线阵的分集组合理论。

第二本书的主要推动力是微波成像在高角分辨力方面的成就。该书认为高分辨力是高质量成像的一个必要条件,但却并非一个充足条件。它把课题“如何形成满意的微波图像”的研究工作留给了此书,因为这是一个合适的副标题。

本书有两个截然不同的部分。第一部分叙述微波成像是什么、如

何得到它以及得到满意微波图像时有些什么问题。这一部分包含在前面四章内。余下的八章叙述提高图像质量所采用的许多技术。第5和6章讨论图像分集组合的实现方法。第7章引入消除图像人为物体以及通常改善图像质量的去卷积法,主要讨论称作“净化(CLEAN)”的技术,它最初是为射电天文学而提出的。第8和9章讨论极大阵列成功运转所必需的自校准方法。第10章叙述降低大型高分辨力相控阵系统数据处理要求的方法。第11章讨论空间数据的超分辨力、非傅里叶处理的原理和实践问题,把它推广至近场,并应用于微波成像,其目的在于提高由一给定孔径得到的可用分辨力。Valley Forge 研究中心发现的有用显示技术在第12章内介绍作为本书的结束。

本书所叙述的大量工作来自 Valley Forge 研究中心。曾参与的教师、学生及工作成员有 R. S. Berkowitz、C. N. Dorny、F. Haber 和 S. H. Taheri(已故)教授;我的学生 E. H. Attia、J. Tsao、H. Subbarom、Z. Liang 和 B. Kang 博士以及 W. Lee 先生和 S. Patrick 小姐;技术小组成员 Messers D. Carlson、W. Whistter、S. Seeleman、T. Seeleman 和 W. Borders。本书是与我的学生而现在为我同事的 Harish Subbaram 博士合著的。原稿的准备和结尾工作是由 Shirley Levy 小姐负责的,笔者向她致以诚挚的谢意。Valley Forge 研究中心长期场地经理和亲密的朋友 Sam Seeleman 先生设计和建造了所有大而复杂的天线阵,其中包括首先向我们提供微波段、光学角分辨力的 83m 阵列。

Bernard D. Steinberg

宾夕法尼亚州费城

一九九一年四月



# 目 录

|                 |      |
|-----------------|------|
| 第一章 微波成像概论      | (1)  |
| 1.1 微波成像系统的类型   | (1)  |
| 1.2 地面微波成像的目的   | (6)  |
| 1.3 地面成像系统      | (6)  |
| 1.3.1 无线电摄像机    | (6)  |
| 1.3.2 合成孔径雷达    | (6)  |
| 1.3.3 逆合成孔径雷达   | (7)  |
| 1.3.4 逆合成无线电摄像机 | (7)  |
| 1.4 图像质量        | (7)  |
| 1.4.1 分辨力       | (8)  |
| 1.4.2 目标动态范围    | (8)  |
| 1.4.3 图像对比度     | (10) |
| 1.4.4 边缘和边界连续性  | (10) |
| 第二章 微波成像的数学     | (12) |
| 2.1 波长          | (12) |
| 2.2 需要极大孔径      | (12) |
| 2.3 相控阵         | (16) |
| 2.4 算符表示法       | (26) |
| 2.5 近场          | (31) |
| 2.6 二维成像        | (36) |
| 2.7 极面投影        | (42) |
| 2.8 宽带          | (46) |

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第三章 宽带效应 .....           | (47) |
| 3.1 延时控制的需求 .....        | (47) |
| 3.2 相移控向的局限性 .....       | (48) |
| 3.3 用延时取代近场成像用的移相器 ..... | (53) |
| 3.4 延时是离散的 .....         | (57) |
| 3.5 用计算机完成成像处理 .....     | (62) |
| 3.6 使用移相器引起的损失 .....     | (65) |
| 3.6.1 阵列增益损失 .....       | (65) |
| 3.6.2 旁瓣电平的提高 .....      | (70) |
| 3.7 带宽对分辨力的影响 .....      | (77) |
| 3.8 带宽对旁瓣或背景电平的影响 .....  | (78) |
| 第四章 微波成像中的问题 .....       | (84) |
| 4.1 长波长 .....            | (84) |
| 4.2 散射效应 .....           | (84) |
| 4.2.1 低目标质量 .....        | (85) |
| 4.2.2 大动态范围 .....        | (85) |
| 4.2.3 镜面反射占优势 .....      | (85) |
| 4.2.4 图像的人为物体 .....      | (86) |
| 4.2.5 低信息含量 .....        | (86) |
| 4.2.6 相干斑 .....          | (88) |
| 4.3 大孔径效应 .....          | (89) |
| 4.3.1 场池布置 .....         | (92) |
| 4.3.2 自校准 .....          | (92) |
| 4.3.3 相位失真 .....         | (94) |
| 4.3.4 单元价格和数量 .....      | (98) |

|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| 4.3.5 栅瓣 .....                           | (98)  |
| 4.3.6 随机阵列的高旁瓣 .....                     | (103) |
| 4.3.7 数据处理要求 .....                       | (103) |
| 第五章 分集 .....                             | (108) |
| 5.1 分集图像 .....                           | (106) |
| 5.2 旁瓣降低 .....                           | (108) |
| 5.3 单元位置分集 .....                         | (109) |
| 5.4 频率分集 .....                           | (114) |
| 5.5 极化分集 .....                           | (117) |
| 5.6 轴对称分集 .....                          | (117) |
| 5.7 视角分集 .....                           | (119) |
| 5.7.1 无线电摄像机成像 .....                     | (121) |
| 5.7.2 合成孔径雷达(SAR)和逆合成孔径雷达(ISAR)<br>..... | (122) |
| 5.7.3 双接收机逆合成孔径雷达 .....                  | (125) |
| 5.7.4 实验 .....                           | (126) |
| 5.8 发射机位置分集 .....                        | (132) |
| 第六章 发射机位置分集 .....                        | (137) |
| 6.1 引言 .....                             | (137) |
| 6.2 表示法和假设 .....                         | (139) |
| 6.3 非相干发射机位置分集 .....                     | (140) |
| 6.3.1 引言 .....                           | (140) |
| 6.3.2 目标相位的随机化 .....                     | (142) |
| 6.3.3 非相干分集图像 .....                      | (145) |
| 6.3.4 非相干分集图像与不相干目标图像的比较 .....           | (147) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 6.3.5 计算机仿真 .....            | (150) |
| 6.3.6 假设的讨论 .....            | (153) |
| 6.4 相干发射机位置分集 .....          | (154) |
| 第七章 去卷积 .....                | (160) |
| 7.1 逆滤波 .....                | (160) |
| 7.2 净化 .....                 | (161) |
| 7.3 微波成像中的非相干净化 .....        | (166) |
| 7.4 相干净化 .....               | (174) |
| 7.5 相干净化的停止准则 .....          | (177) |
| 7.6 相干净化的分析 .....            | (178) |
| 7.6.1 信号和噪声图像的峰值人为物体电平 ..... | (181) |
| 7.6.2 目标参数估计 .....           | (183) |
| 7.6.3 目标对消 .....             | (185) |
| 7.6.4 门限更新 .....             | (186) |
| 7.6.5 相干净化的概要 .....          | (187) |
| 7.6.6 供相干净化用的随机阵列的设计 .....   | (188) |
| 7.7 图像质量的改善 .....            | (189) |
| 7.7.1 净化对对比度和动态范围的影响 .....   | (189) |
| 7.7.2 净化对相干斑的影响 .....        | (195) |
| 7.7.3 相干净化对实验微波数据的作用 .....   | (196) |
| 第八章 自适应波束形成(I) .....         | (201) |
| 8.1 定义和特性 .....              | (201) |
| 8.2 单个主散射体上的自适应波束形成 .....    | (205) |
| 8.3 无线电摄像机 .....             | (209) |
| 8.4 主散射体算法(DSA)实验 .....      | (221) |

|                      |                                       |       |
|----------------------|---------------------------------------|-------|
| 8.5                  | 波束形成器统计特性 .....                       | 221   |
| 8.6                  | 多散射体算法(MSA) .....                     | 224   |
| 8.7                  | 主散射体算法与多散射体算法的比较 .....                | 235   |
| 8.7.1                | 角精度 .....                             | 237   |
| 8.7.2                | 剩余相位误差的方差 .....                       | (237) |
| 8.7.3                | 图像相关 .....                            | (237) |
| 8.8                  | 主散射体算法和多散射体算法的实验 .....                | (238) |
| 8.8.1                | 单元 2 的一维横向距离图像 .....                  | (239) |
| 8.8.2                | 二维距离方位图像 .....                        | (242) |
| 8.8.3                | 图像相关 .....                            | (243) |
| 8.9                  | 子阵的应用 .....                           | (245) |
| 8.10                 | 子阵实验 .....                            | (251) |
| 8.11                 | 观察结果 .....                            | (255) |
| 第九章 自适应波束形成(Ⅱ) ..... |                                       | (257) |
| 9.1                  | 单位延迟空间相关算法 .....                      | (257) |
| 9.1.1                | 基本原理 .....                            | (257) |
| 9.1.2                | 近场几何结构和偏离垂射方向控制用的单位延迟<br>空间相关算法 ..... | (261) |
| 9.1.3                | 复相关函数用单位延迟空间相关算法 .....                | (264) |
| 9.1.4                | 噪声对空间相关算法的影响 .....                    | (265) |
| 9.2                  | 单位延迟空间相关算法的实验 .....                   | (266) |
| 9.2.1                | 计算机仿真 .....                           | (266) |
| 9.2.2                | 海杂波实验 .....                           | (267) |
| 9.3                  | 多重延迟空间相关算法 .....                      | (269) |
| 9.3.1                | 米勒定理 .....                            | (269) |

|        |                                     |       |
|--------|-------------------------------------|-------|
| 9.3.2  | 微波情况 .....                          | (272) |
| 9.3.3  | 多重延迟空间相关算法 .....                    | (273) |
| 9.4    | 多重延迟仿真实验 .....                      | (287) |
| 9.5    | 与其它算法的比较 .....                      | (288) |
| 9.6    | 以能量守恒原理为基础的算法 .....                 | (295) |
| 9.6.1  | 赵氏(Tsao)原理 .....                    | (295) |
| 9.6.2  | 无噪声性能 .....                         | (298) |
| 9.6.3  | 计算效率高的能量守恒算法 .....                  | (301) |
| 9.6.4  | 能量守恒算法与单位和多重延迟空间相关算法的<br>性能比较 ..... | (307) |
| 9.7    | 观察结果 .....                          | (311) |
| 第十章    | 数据简化 .....                          | (315) |
| 10.1   | 数据量化 .....                          | (316) |
| 10.2   | 原理 .....                            | (318) |
| 10.2.1 | 图像质量的度量方法 .....                     | (318) |
| 10.2.2 | 质量度量方法的试验 .....                     | (319) |
| 10.3   | 其它失真模型 .....                        | (324) |
| 10.4   | 相关度量的实验验证 .....                     | (326) |
| 10.5   | 计算要求的降低 .....                       | (330) |
| 10.6   | 最佳数据量化 .....                        | (333) |
| 10.6.1 | 最佳幅度量化器 .....                       | (334) |
| 10.6.2 | 最佳相位量化器 .....                       | (336) |
| 10.6.3 | 最佳量化器 .....                         | (337) |
| 10.7   | 有关利用数据量化进行位压缩的结论 .....              | (338) |
| 10.8   | 通带频谱占用率的降低 .....                    | (339) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 10.9 周期频谱稀布.....             | (342) |
| <b>第十一章 超分辨力</b> .....       | (347) |
| 11.1 引言.....                 | (347) |
| 11.2 自回归权矢量的估计.....          | (353) |
| 11.3 目标相位对阵列原点的依赖关系.....     | (358) |
| 11.4 周期阵列的数据相关估计;空间平滑 .....  | (359) |
| 11.5 其它超分辨力技术.....           | (368) |
| 11.6 采用自适应波束形成的近场校正.....     | (371) |
| 11.7 相干微波成像中超分辨力技术的实际应用..... | (372) |
| 11.8 超分辨力和傅里叶图像的实验比较.....    | (374) |
| 11.8.1 以子孔径为基础的比较.....       | (374) |
| 11.8.2 以等数据组为基础的比较.....      | (376) |
| 11.8.3 其它结果.....             | (378) |
| 11.9 讨论.....                 | (384) |
| <b>第十二章 显示技术</b> .....       | (385) |
| 12.1 门限.....                 | (385) |
| 12.1.1 噪声门限.....             | (386) |
| 12.1.2 行均方根值门限.....          | (388) |
| 12.1.3 窗门限.....              | (389) |
| 12.2 空间滤波.....               | (392) |
| 12.2.1 中值滤波.....             | (392) |
| 12.2.2 平方平均.....             | (393) |
| 12.2.3 高斯平均.....             | (394) |
| 12.3 目标样板.....               | (395) |
| <b>参考文献</b> .....            | (397) |

# 第一章 微波成像概论

## 1.1 微波成像系统的类型

微波成像是以长波长的微波能量来形成图像。待成像的目标或景像由一台微波发射机来照射，而反射或散射的能量由接收天线截获。接收系统处理微波回波十分类似于摄像机把镜头上的光场变换成焦平面上的一幅图像。诸如雷达发射机这样的微波源起着光学摄影中太阳所起的作用。

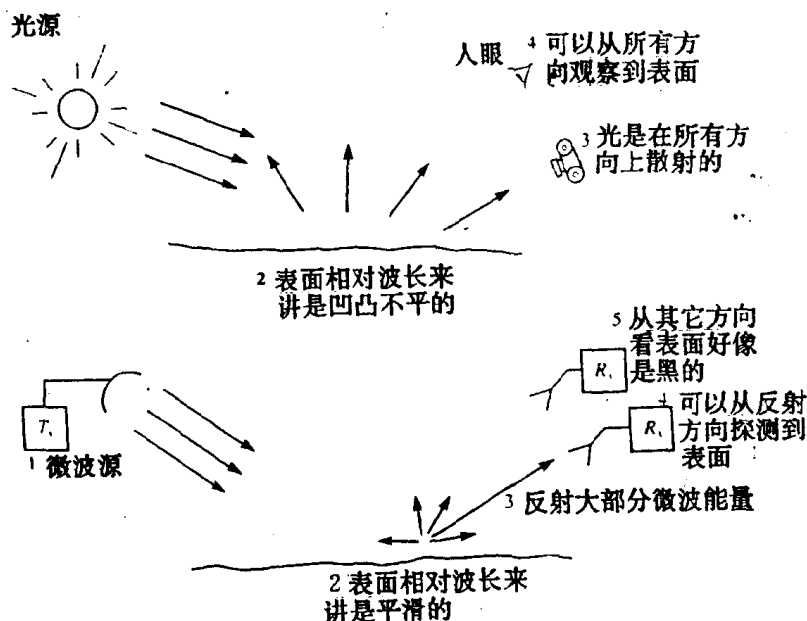


图 1.1 散射短波长的光，长波长的微波辐射大部分被反射

图 1.1 示出光学成像与微波成像之间的基本相似性：两者均需



要一个辐射源、一个散射或反射面和一些接收机。但是,图像是完全不同的,该图指出为什么会这样的一个理由:粗糙的表面散射光波,而同样的表面对微波来说可能是平滑的,并产生镜面反射。第 4.2 节中讨论了这种差异及其后果。

图 1.2 示出光学成像与微波成像之间的另一差异。摄像机从小船上方的一个位置上给船内的小孩成像。这张光学照片是张角一角图像。距离维已在图像平面上消失。

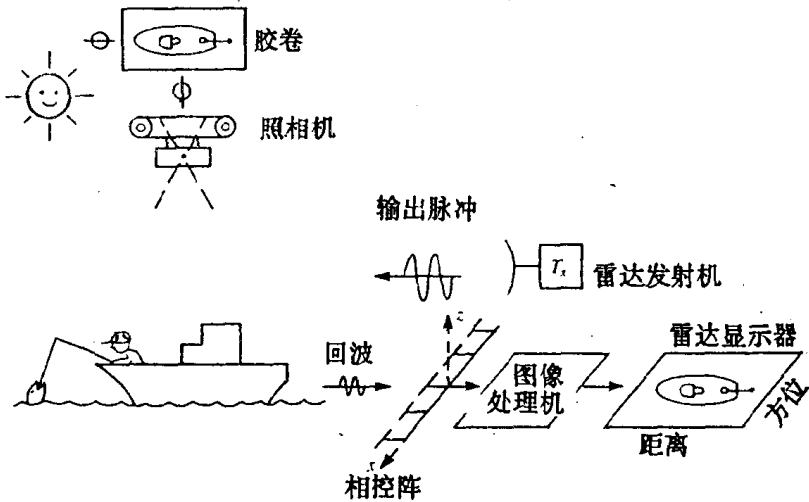


图 1.2 空中照片与表面至表面的微波图像提供目标的同一视图。摄像机的图像平面与目标方向垂直,而雷达图像平面包含目标方向

为了用一个脉冲微波系统实现同样的图像取向,到观察设备的方向旋转了  $90^\circ$ 。其原因是图像维是距离一角度的。雷达发射机向小船发射一个脉冲(或一串脉冲)。要接收的第一个回波来自小船的尾部;最后一个回波来自鱼。距离维取代了光学照片中的角度维。另一维是角度或横向距离。该方向内的分辨力需要一个大的微波孔径。该天线通常是一个相控阵,它与跟在其后的图像处理机构成光学镜头相对应的模拟设备。

本书论述地面微波成像技术,就是在靠近地球表面一段较长距