



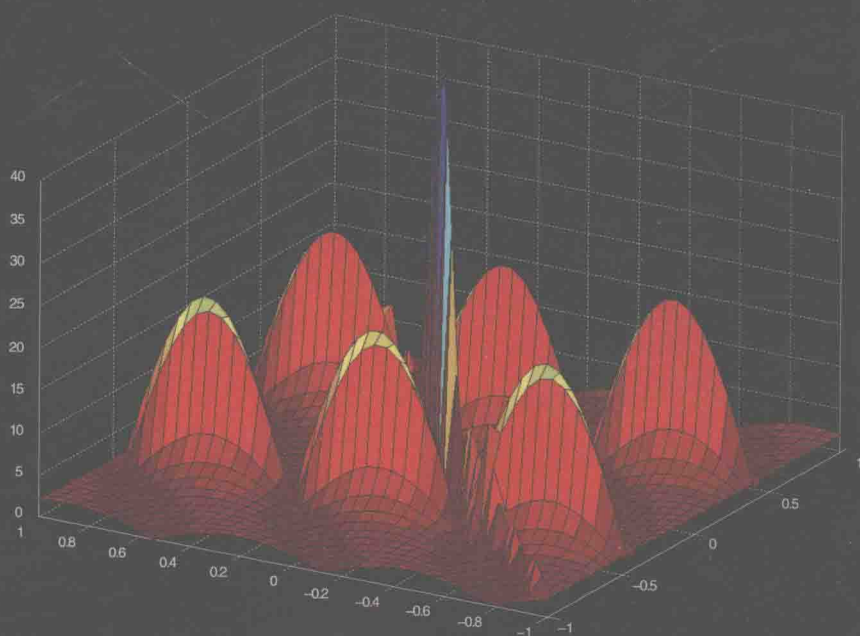
MTI and Pulsed Doppler Radar
with MATLAB

动目标显示 与脉冲多普勒雷达

(MATLAB程式设计)

【美】D.Curtis Schleher 著

戴幻尧 申绪润 赵晶 李金梁 张杨 焦斌 张学成 译
谢虹 孔德培 审校



 ARTECH HOUSE
BOSTON | LONDON



国防工业出版社
National Defense Industry Press

动目标显示与脉冲多普勒雷达

(MATLAB 程序设计)

MTI and Pulsed Doppler Radar With MATLAB

[美] D.Curtis Schleher 著

戴幻尧 申绪润 赵晶

译

李金梁 张杨 焦斌 张学成

谢虹 孔德培

审校

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2014-012 号

图书在版编目 (CIP) 数据

动目标显示与脉冲多普勒雷达: MATLAB 程式设计/(美)施莱赫(Schleher, D.C.) 著; 戴幻尧等译. —北京: 国防工业出版社, 2016.1

(科工精译)

书名原文: MTI and Pulsed Doppler Radar with MATLAB

ISBN 978-7-118-10435-6

I. ①动… II. ①施… ②戴… III. ①动目标显示雷达—Matlab 软件—程序设计 ②多普勒天气雷达—Matlab 软件—程序…IV. ①TN959.71-39 ②TN958-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 235151 号

Translation from the English language edition: MTI and Pulsed Doppler Radar with MATLAB by D.Curtis Schleher.

©2012 ARTECH HOUSE 685 Canton street Norwood, MA02062 Allrights reserved.

本书简体中文版由 Areech House, Inc.授权国防工业出版社独家出版发行。版权所有, 侵权必究。

动态目标显示与脉冲多普勒雷达 (MATLAB 程式设计)

MTI and Pulsed Doppler Radar with MATLAB

※

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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 30 字数 752 千字

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 128.00 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

译者序

动目标显示 (MTI) 是利用杂波抑制滤波器抑制各种杂波, 提高雷达信号的信杂比, 以利于运动目标检测的技术。杂波对消器是最早出现、也是最常用的 MTI 滤波器之一。由于 MTI 对地物杂波的抑制能力有限, 为此在 MTI 后可级联窄带多普勒滤波器组来覆盖整个重复频率的范围。由于杂波和目标的多普勒频移不同, 它们将出现在不同的多普勒滤波器的输出端, 从而达到在强杂波中检测目标的目的。

基于上述优势, MTI 技术和多普勒处理技术被广泛应用于微波雷达中, 作为一种主动航天、航空、遥感手段, 在气象探测、军事目标探测、环境保护、灾害检测、海洋观测、资源勘察、精细农业、地质测绘等方面有着广泛的应用, 目前已成为高分辨对地观测和全球资源管理的最重要手段之一。以其中的典型代表——合成孔径雷达 (SAR) 技术为例, 经过三十余年的发展, 我国在系统研制、数据获取、信息处理及遥感应用方面取得了一系列重大的技术突破和丰硕的科研成果。

本书作者 D·C·施莱赫是雷达电子战领域的著名专家, 长期从事电子战装备的设计工作, 曾经撰写过《信息时代的电子战》一书, 该书堪称是国内雷达电子对抗专业人员的经典读本, 书中提供了很多早期闻所未闻的新技术、新方法。另外, 作者 D·C·施莱赫具有丰富的教学和培训经验。因此, 与目前国内现有的脉冲多普勒雷达导论性著作相比, 本书具有密切结合工程实践的特点, 深入浅出, 从物理概念层面给出了更多的阐述, 从实际雷达数据层面给出了翔实可靠的分析结果, 融入了作者三十多年来的工作经验和科研成果, 提供了大量动目标显示脉冲多普勒雷达设计中的新思想、新观点, 给出严格的数学推导。

为便于读者更深入地理解 MTI 和脉冲多普勒 PD 雷达系统的相关概念与方法, 本书详细地介绍了脉冲多普勒雷达的基础概念和技术原理, 并辅以严密的数学推导, 在国防科学技术领域中, 学术水平高, 内容有创见性, 在学科上居领先地位, 在工程技术理论方面有突破和应用潜力。

作者在 MIMIC 固态发射机、相控阵天线、机载有源电扫阵列、干涉 GMTI、空时自适应处理 (STAP)、热杂波、横向滤波器、多普勒波束锐化、逆合成孔径雷达、圆极化天线等方面进行了较为详尽的分析, 进一步提升了本书的学术水平。本书学术思想新颖, 内容具体、实用, 对我国国防科技和武器装备发展具有较大推动作用。

本书还给出了 MTI 雷达、PD 雷达系统在实际实现中的许多技术实现细节, 包括波形设计、重频选择、最优检测处理等, 填补了目前我国在杂波特性、实测数据分析, 杂波抑制、动目标显示 (MTI) 和多普勒处理的优化理论方面的空白, 具有很高的技术参考价值和军事应用前景。

全书给出了 700 多个方程、300 多幅插图、100 多个 MATLAB 程序和 32 个设计实例, 提供了一套完整的 MTI 和 PD 雷达系统分析与设计辅助工具。基础概念、技术原理、数学推导、实现细节、设计工具, 这样一种全面、合理的分析设计方法, 使本书成为目前在市面所能看到的最完备的关于 MTI 和 PD 雷达系统分析设计的著作。如此高水平的学术专著在国内业界

出版发行有强烈的需求。

本书面向群体广泛，非常适合雷达相关专业学生及雷达工程师用来分析、理解 MTI 和 PD 雷达系统及其他众多相关问题，不仅适合于雷达工程等相关专业的硕士、博士研究生的研究生教材。而且还可作为雷达系统工程师和系统高级用户的参考书是具有高价值的参考资料。每一章都包括深刻理解 MTI 和 PD 雷达原理所需要的原理分析和数学推导，此外每一章还开发了专用的 MATLAB 程序/函数，所有的程序都可以根据使用者的需求，改变输入参数或使用参数的默认设置来进行仿真分析，得到直观、逼真的仿真结果，以进一步提高对理论的理解，并提供确定雷达系统设计要求的原始资料。受条件所限，原书附带程序未能体现，读者如有需求，可联系译者或出版社（译者联系方式 Email: leoneast@163.com）

很荣幸能将这本书的中文版带给国内读者，相信本书会给从事相关工作的读者带来裨益。

本书由戴幻尧博士、申绪润高级工程师、赵晶博士、李金梁博士后和张杨、焦斌助理研究员共同翻译，由谢虹研究员、孔德培高工完成全书的统稿和审校工作。翻译的工程中，国家自然科学基金委员会、电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室、中国洛阳电子装备试验中心总装驻上海地区军代室等多家机构给予了关怀和指导，侯建洲、任翔宇、石川、黄振宇、韩国强、崔建岭、乔会东、刘文钊、王建路、焦斌、狄东宁、周波等同志给予热心帮助，并提出了宝贵建议，译者在此一一表示感谢。

本书内容丰富、覆盖面广，鉴于译者经验和水平有限，有些问题还在进一步深入研究，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

译者

2015 年 10 月

前言

噪声背景中的雷达目标检测性能已得到充分论述。但实际中,大部分雷达还必须应对大量的无关回波(统称为杂波),它们可能来源于地表、海面、降雨、颗粒、箔条、鸟类、昆虫和极光反射等。大多数情况下,杂波幅度将比真实目标回波大几个量级。从杂波背景中提取真实目标的唯一实用方法便是使用动目标显示与脉冲多普勒雷达,它们均是利用多普勒频移的差异来区分真实目标与杂波的。MTI和PD雷达动目标检测性能优异,已成为大多数现代雷达的关键功能之一。但多普勒处理引起的损耗同样可能明显超过噪声限制雷达,从而导致探测距离低于预期。

《动目标显示与脉冲多普勒雷达(MATLAB版)》对MTI和PD雷达设计与性能分析中相关的理论与实际问题进行了透彻论述。本书着重分析了雷达杂波特性,以及MTI和PD雷达从杂波背景中提取真实运动目标的原理。首先建立了杂波中运动目标最优检测的理论基础,这与MTI和PD雷达的实现密切相关;然后推导了这些雷达系统中的各种理论关系;最后阐明了MTI和PD雷达的应用实例。

本书叙述了多种现代多普勒雷达系统的特性,包括民用/军用对空监视雷达、空中预警与截击、防空导弹雷达系统、合成孔径雷达(SAR)监视系统、GMTI和逆合成孔径雷达(ISAR)系统等,并对上述雷达系统的性能进行了评价,其中包括一个用于空中目标监视的MATLAB设计工具。同时,本书还讨论了相关科技的主要进展,包括MIMIC固态发射机、相控阵天线、机载有源电扫阵列天线、干涉GMTI、空时自适应处理、热杂波、干涉SAR、横向滤波器、多普勒波束锐化、ISAR、应用于MTI的圆极化天线等。

书中的MATLAB程序可帮助读者分析与设计MTI和PD雷达系统,而不是枯燥地学习书中的730个公式。全书包含100多个MATLAB程序,分布在全书的32个设计实例中。

第1章涵盖了多普勒处理的基本原理,并概述了MTI和PD雷达系统的典型特征,分析了多种现代多普勒雷达系统的特征,比较了它们设计准则和性能上的差异。从雷达分辨单元的角度出发,探讨了杂波和接收机热噪声背景下的雷达检测一般问题,并推导了最优MTI和PD方法。采用环境图分析了多种杂波的特性,导出了多普勒雷达分析中常使用的高斯、非高斯分布杂波模型。最后深入地探讨了不同动目标检测器的结构,这是现代多普勒处理技术在对空监视雷达中最重要的应用之一。动目标检测器(MTD)是一类典型的低重频脉冲多普勒雷达,它几乎可实现对运动目标的最优检测,同时还具有多种虚警率控制机制,比如采用多普勒滤波恒虚警率检测、数字杂波图等。

第2章叙述了波形设计和多普勒滤波的基本原理及其在MTI和PD雷达中的应用。通常,脉冲多普勒雷达采用的波形可分为低重频(测距不模糊)、高重频(测速不模糊)、中重频(距离和多普勒均模糊)。每种波形与杂波的相互作用均不相同,需要采用不同的信号处理方式。实际中,发射波形的选取由雷达的应用场合和性能需求综合决定。多普勒滤波器的需求主要由发射波形决定。多普勒滤波处理中横向滤波器性能最优,但硬件密集、结构复杂。在MTI处理中可采用梳状滤波器(比如延迟线对消器),同样也可用在多普勒滤波器组前端以形成杂波凹口滤波器。多普勒滤波器中的相邻滤波器组通常采用FFT算法以数字形式来实现。本章最后,详述了现代雷达系统广泛采用的数字信号处理器。

第3章分析了PD雷达和MTI雷达系统的检测性能。采用雷达分析中的常用的检测概率、虚警概率准则来分析检测性能，它与MTI改善因子密切相关，而改善因子也成为多普勒雷达性能评价的标准。改善因子与两种不同的程度相关，一是理想多普勒处理器对杂波频谱的作用程度，二是系统不稳定程度，包括发射机、本振噪声等。通常系统不稳定度决定了性能边界，当采用恰当的雷达、多普勒滤波器参数来设计系统时将会达到。

第4章讨论了雷达杂波问题。首先叙述了陆地、海洋、气象和箔条杂波的平均后向散射系数和功率谱，这些数据是通过多个试验方案确定的。利用上述数据，进行了参数估计，并详细地分析了杂波模型，包括高斯分布、瑞利分布、对数正态分布、Weibull分布和K分布。此外，考虑了一些应用于杂波计算机模拟的环境模型。最后分析了采用圆极化天线前端的MTI处理器的性能。

第5章讨论了MTI和PD雷达的理论基础。首先，在高斯分布杂波和接收机热噪声背景的假设下，提出了具有随机初始相位及多普勒频移的 N 个相参脉冲的一般检测问题。理论推导表明，采用复加权的线性横向滤波器并串接包络检波器是最佳检测器形式。MTI方法适用于所有目标速度相同的情形，而PD方法则适用于具有目标多普勒特征先验信息的场景。通过MTI串接相干积累器（如FFT）或非相干积累器，可实现次优检测器。最后，分析对比了最优、次优滤波器的检测性能。

第6章探讨MTI系统设计的各个方面。首先分析了不同类型的相干、非相干MTI处理方式，并定量评估了相应陆基和机载系统的性能。利用接收机失真理论，本章还分析了MTI处理在非线性接收机下的性能局限。然后讨论了递归、非递归MTI滤波器设计理论，并给出了相关设计实例。MTI系统的模糊速度响应导致了在雷达重频下的盲速，可通过脉冲重频参差来加以消除。重频参差修正了MTI的速度响应特性，这种响应是参差方式和对消器阶数的函数。最后给出了设计曲线，它表明当不采用重频参差时将会导致较高的检测增益损耗。

第7章探讨脉冲多普勒系统设计的各个方面。首先分析了PD雷达系统的一般配置和波形设计，着重分析了它们的性能局限。高重频系统设计中的距离解模糊可通过发射多重脉冲、采用频率调制测距波形来实现。然后探讨了现代有源电扫阵列机载截击雷达的设计。最后分析了主瓣杂波、高度线杂波的特性，它们是一些多重高重频PD雷达设计中的关键参数，因为各距离段杂波折叠至一个距离单元中，导致目标回波需要与强杂波竞争。

第8章探讨了应用多普勒效应的多种实际雷达系统。本章叙述自成体系，提供了技术细节以便读者清晰理解相关原理。所述专题包括多普勒波束锐化、SAR、干涉SAR、空时自适应处理（STAP）、热杂波、ISAR，并设计了一个用于对空监视雷达设计的交互式MATLAB工具。

随书附带的CD-ROM光盘包含了MATLAB程序、彩色插图、MATLAB使用简明教程，以及光盘使用说明。

如果合适，作者想向许多人致以谢意，感谢他们在本书原稿准备过程中提供的无私帮助。我的妻子Carol输入了原稿及其修订内容，包括文中的全部公式。David K. Barton认真地审阅了原稿，并提出了许多建设性的修订意见，这些内容已包含在本书中。同时，本书第一版出版后，许多学生在使用中编写了MATLAB代码，并提出了有益的注释。

D. Curtis Schleher
Camano Island, Washington
2010

目 录

第 1 章 基本原理与综述

1.1	MTI 雷达和 PD 雷达的应用	1
1.2	多普勒效应	11
	例 1 利用多次多普勒测量信息确定目标运动轨迹	12
1.3	多普勒处理基础	13
1.3.1	分辨率的考虑 ^[32,33]	13
1.3.2	面杂波环境中的 MTI 多普勒滤波器	14
1.3.3	面杂波和体杂波环境中的 MTI 多普勒滤波器	16
1.3.4	脉冲多普勒雷达的基本原理 ^[2]	18
1.4	环境图 ^[1,35]	22
1.5	杂波模型 ^[1]	25
1.5.1	杂波的高斯模型或瑞利模型 ^[1,43]	25
1.5.2	杂波 RCS	26
例 2	基于常系数 Gamma 模型求出后向散射系数 σ^0	28
1.5.3	杂波谱与自相关函数	30
例 3	指数形地杂波谱情况下的 MTI 改善因子	34
1.5.4	非高斯杂波模型	35
1.6	动目标检测器	41
1.6.1	杂波图	49
	参考文献	55

第 2 章 多普勒雷达波形设计与滤波

	例 4 高重频雷达主瓣杂波的放大系数	59
2.1	重频类型的定义 ^[3]	63
2.2	信号处理与系统比较	64
2.2.1	低重频雷达	64
2.2.2	高重频雷达	69
2.2.3	中重频雷达 ^[2,7,8]	71
2.3	多普勒滤波	75
2.3.1	相参 MTI 与非相参 MTI	76
2.3.2	多普勒滤波的频域特性	80
例 5	赋形 MTI 对消器的设计	85
2.3.3	数字式多普勒滤波器	87
例 6	级联式 MTI - FFT 多普勒滤波器	93

第3章 多普勒雷达性能度量

3.1	MTI 改善因子	106
	例7 改善因子分析	110
3.1.1	非相参 MTI 改善因子	114
3.1.2	对消率	116
3.2	杂波对多普勒雷达性能的影响	120
3.2.1	内部运动杂波谱	122
3.2.2	天线扫描引起的杂波谱	124
3.2.3	平台运动杂波谱	126
3.2.4	发射机不稳定带来的谱展宽	129
3.2.5	杂波限幅频谱展宽	130
3.2.6	PRF 参差对改善因子的限制	135
	例8 MTI 系统中的速度损耗	135
3.2.7	运动补偿损耗对改善因子的限制: TACCAR 和 DPCA	139
	例9 运动补偿 MTI 的改善因子	140
	例10 运动补偿自适应数字 MTI ^[28]	145
3.2.8	对改善因子的综合影响	149
3.3	振荡器对多普勒雷达性能的影响	151
	参考文献	158

第4章 杂波特性和实测数据分析

4.1	面杂波	163
4.1.1	地杂波	168
	例11 地杂波后向散射系数模型	177
4.1.2	海杂波	186
	例12 海杂波后向散射系数模型	193
4.2	大气杂波	205
4.2.1	降雨杂波	207
	例13 降雨杂波和箔条杂波中雷达的探测距离	212
4.2.2	箔条杂波	216
	例14 箔条的基本原理 ^[55]	219
	例15 在地杂波和箔条杂波中采用 FFT 处理后的探测距离	223
4.3	杂波幅度统计的近似计算	225
4.3.1	平均后向散射系数的近似计算	226
4.4	杂波的解析表示法	229
4.4.1	高斯过程表示法	229
4.4.2	杂波的莱斯表示法	231
4.4.3	杂波的对数—正态表示法	232

4.4.4 杂波的韦布尔表示	235
4.4.5 杂波的 K 分布表示	237
例 16 雷达杂波分布的仿真 ^[62]	238
4.5 杂波模型环境	241
4.5.1 IIT 雷达杂波模型	241
4.5.2 搜索雷达模型环境	244
参考文献	247

第 5 章 最优多普勒处理理论

5.1 最优雷达多普勒处理器	252
5.1.1 横向滤波器	252
5.1.2 单点多普勒处理器	258
5.1.3 最优 MTI 处理器	261
例 17 最优和二项式加权对应的 MTI 改善因子	266
5.1.4 等间隔多普勒处理器	267
5.2 级联 MTI—相参积累器 ^[18,19]	270
5.3 级联 MTI—非相参积累器	279
例 18 MTI—非相参积累处理的积累增益	284
例 19 横向滤波器和级联 MTI—FFT 的性能比较	290
参考文献	294

第 6 章 动目标显示 (MTI) 系统

6.1 MTI 结构	296
6.2 动目标性能分析	302
6.2.1 地基监视雷达 MTI 特性	303
6.2.2 机载监视雷达 MTI 特性	303
例 20 DPCA 补偿的 MTI 对消改善因子 ^[3,11,12]	308
6.2.3 非线性接收机的 MTI 性能	311
6.3 MTI 雷达滤波器设计	314
6.3.1 非递归型 MTI 滤波器	314
例 21 传递函数和 MTI 改善因子	320
6.3.2 递归型 MTI 滤波器	321
6.3.3 多普勒滤波器组——横向滤波器	332
6.4 PRF 参差	334
6.4.1 PRF 参差盲速	336
例 22 PRF 参差的传递函数和零点深度	337
例 23 MTI 的 PRF 参差速度损耗和改善因子损耗	339
6.4.2 一次对消器 MTI 的 PRF 参差	342
6.4.3 PRF 参差的双延迟线对消器 MTI	345
例 24 PRF 参差的 MTI 改善因子	347

6.4.4 参差 MTI 对消器的综合	349
参考文献	350

第7章 脉冲多普勒系统

7.1 脉冲多普勒结构	356
7.2 波形考虑 ^[8,11,15-17]	363
7.2.1 波形占空比方面的考虑事项 ^[8,11]	371
7.2.2 天线副瓣要求 ^[11,21,22]	372
例 25 等值线	376
7.3 现代机载拦截雷达	378
7.4 解距离模糊	385
7.4.1 多重高 PRF 测距 ^[19,36]	385
例 26 中国余数定理	390
7.4.2 调频法测距 ^[8,38]	392
7.5 主瓣杂波	398
例 27 高度线回波	398
例 28 采用脉冲多普勒雷达进行导弹逼近告警	404
参考文献	408

第8章 多普勒雷达系统专题

8.1 多普勒波束锐化	412
例 29 DBS 设计	416
8.2 合成孔径雷达	419
例 30 SAR 设计准则	425
8.3 干涉合成孔径雷达	427
8.3.1 JSTARS ^[44]	429
8.3.2 干涉 GMTI ^[2,8,9]	431
8.4 逆合成孔径雷达	435
8.5 机载雷达空时自适应处理	445
8.5.1 STAP ^[10,28-32,47]	448
8.5.2 杂波内部运动对 STAP 的影响 ^[24,33]	451
8.5.3 STAP 检测	451
8.5.4 采样矩阵求逆	453
例 31 自适应阵列和热杂波 ^[34,48]	453
8.6 MTI 设计工具	458
8.6.1 程序讨论和注意事项	462
例 32 Marcum - Swerling 和 Albersheim 检测因子的比较	465
参考文献	467

第 1 章 基本原理与综述

在由地物、海面、云雨、箔条等物体反射所形成的干扰背景（杂波）中，如果目标与杂波的径向速度不同，动目标指示（MTI）雷达或脉冲多普勒（PD）雷达就具有对其进行检测的能力。MTI 雷达和 PD 雷达既可部署于地面固定站点，也可安装在舰船、飞机或卫星等运动平台上使用^[1-4]。

根据 IEEE 的标准雷达定义，多普勒雷达是指利用多普勒效应，对目标相对于雷达的径向速度分量进行测定，或对具有特定径向速度的目标进行提取的雷达。如果该雷达发射的是脉冲信号，就称为脉冲多普勒雷达。动目标指示则是指提高运动目标检测与显示能力的技术，多普勒处理只是其中的一种实现方法。这些正式定义表明，当存在因地面、海面、云雨、箔条、鸟群、昆虫以及极光等反射所形成的杂波时，MTI 雷达和 PD 雷达的基本思想是利用多普勒效应在杂波环境中提取出较小的运动目标。

MTI 或 PD 雷达的运动目标检测能力为绝大多数现代雷达发挥作用提供了一项关键功能。在诸如空中监视等典型民用领域中，为对空中交通实施管制，必须具备在强地杂波和气象杂波中对未装载应答机的低空小型飞机进行检测的能力；军用领域则更为广泛，既包括对低空飞机和巡航导弹进行检测的陆基（或海基）应用情况，也包括机载告警与控制系统（AWACS）、机载预警系统（AEW）以及机载拦截（AI）雷达等在极强的面杂波环境中下视工作的机载应用情况。

尽管 MTI 与 PD 雷达在本质上是相似的，但两者的理论差异也非常明显。MTI 雷达的理念是用梳状滤波器消除杂波，其阻带置于强杂波所集中的区域，运动目标回波则从未被杂波占据的速度区域通过。而 PD 雷达只是分辨并增强特定频移区间的目标回波，对杂波及所关心频带以外的其他回波则一律抑制。在所感兴趣的频率区间范围内，PD 雷达一般采用一组相邻的多普勒滤波器对目标回波进行匹配检测，也就是说相比于噪声，目标回波在多普勒滤波器组中得到了相参积累，因此 PD 雷达的目标检测能力要比 MTI 雷达更强。

1.1 MTI 雷达和 PD 雷达的应用

多普勒雷达的典型应用就是作为监视雷达，在各种气象条件下检测地表上空飞行的飞机或导弹，此时 MTI 雷达或 PD 雷达的功能就是对地杂波和气象杂波进行抑制，同时保留住目标回波，从而实现目标检测。

当雷达部署于地面时，地物反射形成的地杂波往往要比期望目标回波更强。地杂波会一直延伸到地形特征被地球曲率所遮挡的范围，当地面环境比较平坦时该范围可达 10 ~ 20n mile，如果雷达视野中存在城市或山体的话可能会超过 50n mile，而当存在大气波导效应时则会超过 100n mile。对于机载雷达来说，在其整个作用距离范围内都会存在地杂波。

从低频到毫米波的频段范围内，气象杂波的强度都跟频率的四次方成正比，因此 L 及其以上频段的气象杂波非常明显。与面反射所造成的地杂波或海杂波不同，气象杂波是由体反

射引起的。在雷达的整个作用距离范围内，一般都会存在气象杂波。

图 1.1 所示的 ASR-9 雷达是工作在 S 频段 (2.7 ~ 2.9GHz) 的两坐标空中交通管制雷达，对于 RCS 为 5m^2 的飞机其作用距离可达 60n mile。其中雷达天线上方的阵列天线是空中交通管制雷达信标系统 (ATCRBS) 的组成部分，该系统提供的辅助数据可给出目标的身份信息和飞行高度，以确定其是否为合作目标。

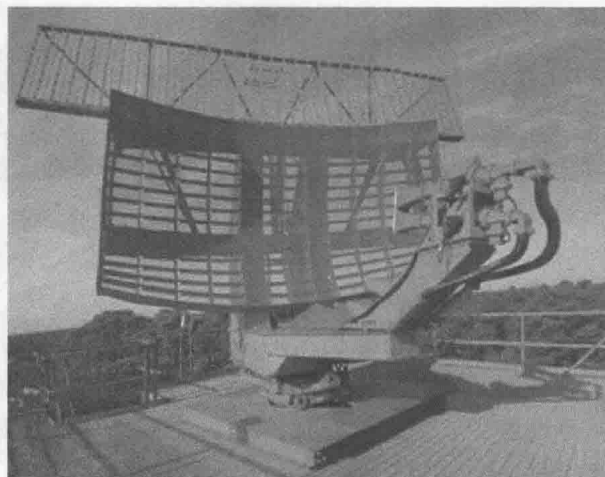


图 1.1 ASR-9/ASR-12 空中交通管制雷达^[76]

ASR-9 雷达的工作参数列于表 1.1 中，该雷达的重要性在于其中首次采用了数字式动目标检测 (MTD) 技术，本章的后续部分将会对该技术予以详述。MTD 的首要功能是可以有效降低虚警概率，而这一直曾是该类雷达早期型号的困扰。该雷达所用速调管发射机的 MTI 稳定因子达 50dB，并采取了以下措施以降低虚警概率：

表 1.1 现代多普勒监视雷达的工作参数

	ASR-9	ASR-12	ARSR-4	TPS-59
类型	两坐标	两坐标	三坐标	三坐标
探测目标	飞行器, 气象	飞行器, 气象	飞行器, 气象	飞行器, 战术弹道导弹
P_t /kW	1200	22	60	54
P_A /kW	1.575	1.45	1.94	9.7
f /GHz	2.7 ~ 2.9	2.7 ~ 2.9	1.215 ~ 1.4	1.215 ~ 1.4
PRF/p/s	1200	1200	216/72	277 ~ 833
PW/ μs	1.05	55, 1	150	100 ~ 800
G_T /dB	33.5	33.5	35	38.9
G_R /dB	33.5/32.5	33.5/32.5	40	38.3
θ_{az} / ($^\circ$)	1.3	1.3	1.41	3.4
ϕ_E / ($^\circ$)	4.8	4.8	两个堆积波束	1.7
极化	线极化或圆极化	线极化或圆极化	线极化或圆极化	线极化
扫描速率/ ($^\circ$ /s)	75	60/72/90	30	36/72
噪声温度/K	627	627	438	540
多普勒带宽/Hz	150	150	同 PRF	同 PRF
信号处理方式	MTD	MTD	8 脉冲 MTI	MTI
脉压后脉宽/ μs	未提供	1.4 (非线性调频)	1.3 (非线性调频)	0.4, 1.6

- (1) 使用大动态范围的准最优线性多普勒滤波器;
- (2) 采用杂波图技术对每一距离—方位分辨单元内的杂波进行线性抑制, 以适应后续的多普勒滤波处理要求;
- (3) 采用自适应的恒虚警 (CFAR) 技术抑制每一感兴趣多普勒单元内的气象杂波;
- (4) 采用审查技术以消除来自其他雷达的脉冲干扰;
- (5) 采用脉组重频参差技术消除盲速问题, 并可减轻气象杂波对多普勒单元内混叠目标所造成的抑制^[5]。

ASR-9 雷达有一个测量和显示云、雨、雾等反射率的专用处理通道, 当雷达部署于某些选定站点时, 该雷达还可测出风的多普勒速度, 以探测较低角度的风切变。

图 1.1 中双喇叭馈源产生了高、低 2 个天线波束, 该雷达以低波束发射信号, 而 2 个波束均进行接收, 其中低波束用于接收远程目标的回波信号, 高波束则用于探测近程目标, 其结果就是降低了地杂波和面反射对高波束的影响, 从而使信杂比提高了 15 ~ 20dB。另外, 容易对近程探测产生影响的鸟群、昆虫等低空飞行物体的回波, 在高波束中也得到了一定程度的衰减。

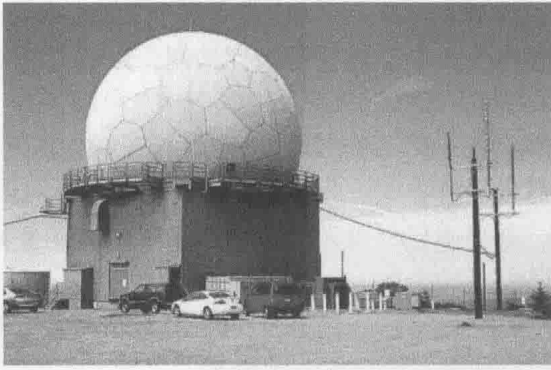
作为 ASR-9 雷达的改进型, ASR-12 雷达既采用了 MTD 技术, 也采用了基于双极性晶体管的固态发射机^[6]。相比于电子管器件来说, 固态发射机不但可靠性和可维修性更高, 而且还能提高 MTI 稳定因子。由于单个 S 频段双极性晶体管的峰值功率只有大约 100W^[7,8], 为使发射脉冲的峰值功率达到 22kW, 必须组合使用数量庞大的晶体管。

ASR-12 雷达的发射脉冲宽度长达 55 μ s, 其信号能量 (1.375J) 与 ASR-9 雷达的基本相当^[9]。由于发射的是宽脉冲, 接收后只能采取脉冲压缩措施才可实现跟 ASR-9 雷达相接近的分辨率 (700 英尺)。为防止较强气象杂波对相邻距离单元的溢出, 必须采用非线性调频的脉压方式以降低距离副瓣。另外, 紧随宽脉冲之后还需发射一个载频不同、脉宽 1 μ s 的短脉冲, 以保持对近程目标的探测能力。

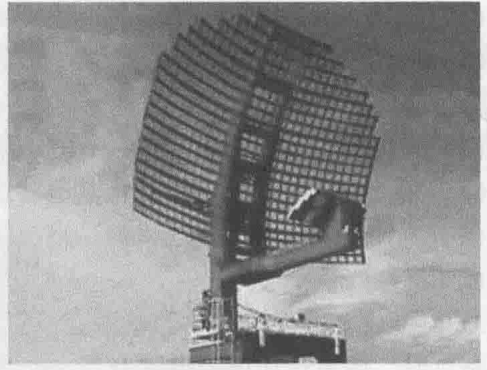
对于双波束天线来说, 高、低波束之间的切换时机取决于雷达部署场地的杂波情况。其中低波束的指向略高于地平线, 采用宽脉冲探测远程目标; 高波束则采用宽、窄两种脉冲探测近程目标。

图 1.2 所示的 ARSR-4 雷达是一种工作在 L 频段 (1.215 ~ 1.4GHz) 的固态、远程 (250n mile)、三坐标、堆积多波束监视雷达, 该雷达既可用于国土防空, 也可用于民航的空中交通管制, 其工作参数已在表 1.1 中给出^[10]。当用于空中交通管制时, 要求该雷达在山地背景环境中、降雨量为 4mm/h 的气象条件下, 对距离 5 ~ 180n mile 范围内、RCS 为 2.2m² 的 Swerling 1 型目标具备探测能力。典型的军用需求包括雷达能在 6500 英尺高度、5 级海况条件下探测到水上飞行的 RCS 为 0.1m² 的巡航导弹, 或是在山地背景环境中对距离 5 ~ 92n mile 范围内、RCS 为 1m² 的空中目标具备探测能力^[11]。

为避免对发射波束形成遮挡, 图 1.2 中的相控阵馈源相对于反射面是偏置的。该馈源由 600 个水平极化和垂直极化的辐射源构成, 分成 23 行排列在一个柱面上, 使得雷达能在 11.25° 的方位扇区内根据气象条件选择收发左旋圆极化、右旋圆极化或线性垂直极化信号。ARSR-4 雷达的目标通道采用相同的圆极化进行收发, 以排除气象杂波的干扰 (这在 L 频段能充分满足要求); 另外还设有气象接收通道, 其接收状态的圆极化方式跟发射状态是完全相反的^[11]。



(a)



(b)

图 1.2 ARSR-4 远程监视雷达^[75,77]

该雷达发射信号时采用宽波束照射，在接收时则把俯仰角覆盖范围划分成宽度为 2° 的 9 个堆积式波束。在任一时刻对信号进行接收的，要么是最低的 5 个堆积波束，要么是最高的 5 个，由于两者的交叠使得第 5 个波束成为高、低堆积波束的共用波束。相比于探测近程目标的高堆积波束来说，探测远程目标的低堆积波束中各波束宽度要窄一些，使得该雷达在整个作用距离范围内对目标的探测高度基本保持在 3000 英尺左右。

为克服面杂波对目标检测的影响，ARSR-4 雷达采用了 8 脉冲 MTI 对消器和 9 种参差的重频。当因天线的扫描调制导致较强的山体杂波频谱有所展宽时，8 脉冲对消器可以形成较宽的凹口将其抑制，这是对 ARSR-3 雷达缺陷的改进，因为实践证明 3 脉冲对消器的山体杂波抑制能力明显不足。9 种参差的重频消除了从 20 ~ 3000 节速度范围内的盲速问题。若雷达需在海面背景环境中工作，就会对 $5.6^\circ \times 8n$ mile 区域内的海浪平均速度进行测定，并据此将 MTI 杂波抑制凹口中心的精度修正到 0.5 节。

L 频段发射机的峰值功率为 60kW，由 2 个间隔 83MHz 的工作频率复用。总的脉冲宽度为 $150\mu\text{s}$ (即 $90\mu\text{s} + 60\mu\text{s}$)，其中低堆积波束的发射信号重频为 216Hz，而将高堆积波束的重频设为 72Hz，以降低来自山体或市区的二次回波影响。与 ASR-12 雷达相同的是，ARSR-4 雷达也采用了非线性调频脉冲压缩方式，以防止气象杂波的副瓣溢出到相邻距离单元中。

虽然 ARSR-4 雷达和 ASR-9/12 雷达都有在面杂波和气象杂波环境中探测空中目标的需求，但两者在多普勒处理系统的设计方面存在着明显的差异。由于没有天线罩的 ASR-9/12 雷达可以部署于小型机场内使用，为在天线尺寸适中的情况下满足方位角分辨率的要求，就必须工作在 S 频段，但该频段的气象杂波较强，仅靠圆极化方式并不能将其完全消除，还需采取 MTD 措施才行。ARSR-4 雷达工作在 L 频段，不但气象杂波较弱，而且圆极化方式还能进一步将其衰减 21dB；对于山体回波等较强面杂波，则采用基于 8 脉冲设计的 MTI 处理器予以消除。ARSR-4 雷达采用了 9 种参差的重频以克服盲速问题，但这使得 MTI 无法对消来自山体或市区的二次回波，为此采取了双 MTI 对消器以及可提高不模糊距离的低重频等特殊措施，导致系统设计变得更加复杂。为满足军用场合的抗干扰需求，ARSR-4 雷达采用了脉组频率捷变的方式发射信号^[11]，但由于进行 MTI 处理需在 8 个脉冲的持续时间内保持信号频率稳定，又导致该雷达容易受到响应式干扰的攻击。

图 1.3 所示的 TPS-59 雷达是用于战术防空的 L 频段 (1.125 ~ 1.4GHz)、固态、远程、三坐标平面相控阵雷达^[12]，该雷达天线的方位向进行机械扫描，俯仰向通过控制相位实现电扫描，使得其笔状波束针对飞行器等目标的俯仰扫描范围为 $0 \sim 19^\circ$ ，针对战区弹道导弹为

$0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。对于 RCS 为 0.1m^2 、飞行速度达 $\text{Ma}7$ 的目标, TPS-59 (V) 3 型雷达的探测距离可达 400n mile 。

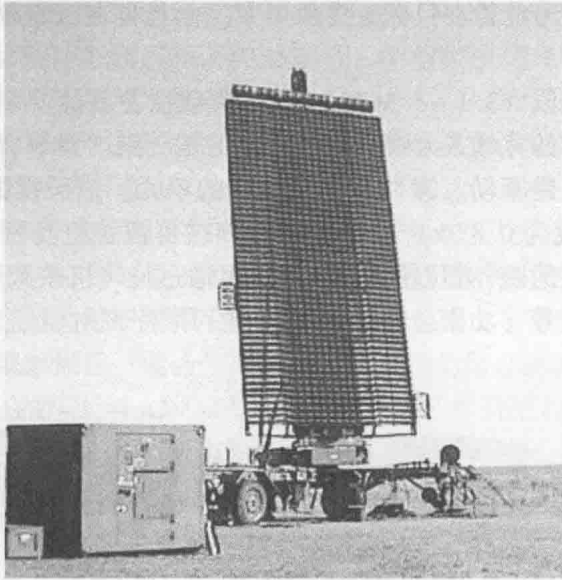


图 1.3 TPS-59 战术防空雷达^[78]

该雷达平面阵列天线的尺寸为 $30\text{英尺} \times 15\text{英尺}$, 共有 54 行完全相同的馈电网络, 每行有 24 个偶极子单元。收发组件直接安装在行馈网络之后, 其中包含发射器、预放大器、移相器、收发转换开关等; 纵向上由 3 个列馈完成行与行之间的馈电分配。每行的发射器由 20 个硅材料双极性晶体管组成, 每个可提供 55W 的功率, 扣除合成损耗后的单行输出功率约为 1000W 。

TPS-59 雷达在 $3 \sim 100\text{n mile}$ 距离范围内的发射信号采用近程波形, 而在 100n mile 至最大作用距离 (大约 300n mile) 范围内则为远程波形。近程波形包含一个常规脉冲和随后的持续时间 $252\mu\text{s}$ 、带宽 2.5MHz 的线性频率调制脉冲, 为满足 MTI 处理需求, 该波形会重复发射 3 次或 6 次; 若波束照射范围内只有地杂波, 则采用三脉冲 MTI 波形, 若同时存在地杂波和气象杂波则采用 6 脉冲 MTI 波形。远程波形包含最多 4 个连续脉冲, 相互之间的频率间隔为 3.75MHz , 且均采用带宽 625kHz 的频率调制, 实际发射的脉冲数量需根据最大作用距离要求和俯仰波束位置确定。

TPS-59 雷达采用 8 个笔状波束进行远程探测 (俯仰角为 $0 \sim 9^{\circ}$), 11 个笔状波束进行近程探测 (俯仰角为 $0 \sim 20^{\circ}$)。由于假定地杂波包含在最低的 3 个近程探测波束中, 因此在这些波位内采用三脉冲 MTI 波形。在 100n mile 以内的测高精度为 1000英尺 , 到 300n mile 时线性增至 3000英尺 。TPS-59 雷达对地杂波的抑制能力是 51.4dB , 对气象杂波是 32.8dB 。

在 L 波段的固态三坐标监视雷达中, TPS-59 和 ARSR-4 是采用不同技术方案实现目标高度测量的典型实例。两种雷达都通过多脉冲 MTI 措施形成较宽的凹口对地杂波进行抑制; 为消除气象杂波, ARSR-4 雷达采用的是圆极化技术^[13], TPS-59 雷达则是在近程波束中采用 6 脉冲 MTI。由于 TPS-59 雷达在俯仰向共有 19 个波位, 在某一方位向对目标进行照射的驻留期间, 所获得的回波脉冲总数有可能不满足 MTI 处理的需求, 因此该雷达的电扫描是有一定缺陷的。比如为使距离不模糊, 远程波束采用的重频为 277Hz , 在每一波位内最多只能对目标照射 2 次, 不能满足 MTI 处理要求, 因而无法抑制 100n mile 以远的气象杂波和箔条干

扰；近程波束内将重频增至 833Hz，从而最多可以获得 6 个脉冲用于地杂波对消和气象杂波对消。采用笔状波束进行扫描也有其好处，就是在对俯仰波束进行发射和接收时有效利用了天线的全孔径，不但使信号能量在目标上更加集中，而且也在一定程度上减少了气象杂波的摄入量。

图 1.4 所示的是 S 频段 (3.1 ~ 3.3GHz) 固态机载预警雷达“埃利眼” (Erieye)，其相控阵天线安装在机身上方的背鳍式天线罩内，采用的是 2 副“背靠背”式的平面阵列，面阵之间共有 192 个由收发组件驱动、靠冲压空气冷却的单元。该天线的每个面阵尺寸为 8m × 0.7m，所产生的波束宽度为 0.8° × 9°，通过移相扫描可覆盖机身两侧各 ±60° 的方位范围；对于机头和机尾方向存在的 60° 方位覆盖盲区，则可通过让飞机按跑道型航线飞行加以解决。两个面阵既可同时发射信号 (功率会有所下降)，也可顺序发射信号^[14-16]。

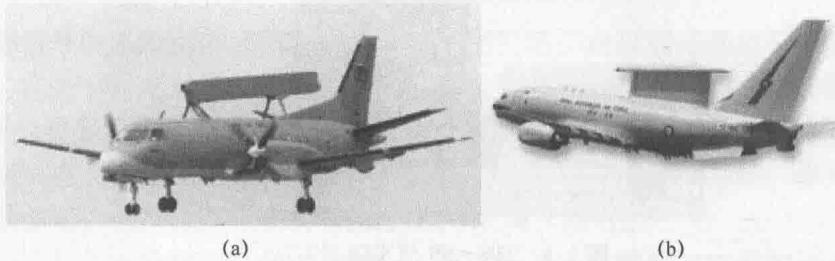


图 1.4 背鳍式机载预警雷达 - “埃利眼”和“楔尾”^[17,79]

由于安装平台飞行在中、高空，机载预警雷达在探测低空目标时就具有视距上的优势，这虽然解决了陆基或海基情况下面临的地形遮挡问题，但也带来了另一个严重问题。比如，机载预警雷达必须以较高掠射角工作于下视模式 (观测地面或海面)，导致杂波的回波幅度升高，甚至超过正常目标回波。虽然在很多年前机载预警雷达就已经开始利用多普勒处理技术，在海面上空来分辨运动目标，但面临地面上空的工作环境时，机载预警雷达所需的杂波中可见度要达到 50 ~ 80dB，这一技术直到不久前才刚刚实现。

图 1.4 中同时给出了“楔尾”机载预警与控制系统，其所使用的 L 频段多功能电扫天线 (MESA) 安装在波音 737 飞机机身上方的背鳍式结构内。为实现 360° 全方位覆盖，MESA 雷达采用了 3 副天线，即 2 副“背靠背”式的侧视相控阵天线和 1 副端射天线阵 (又称为“顶帽”)，其中后者安装在背鳍顶端以提供前视和后视能力。侧视天线阵的尺寸为 18 英尺 × 6 英尺，可以覆盖机身两侧各 ±60° 的方位范围；端射天线阵的尺寸为 25 英尺 × 6 英尺，可在机头、机尾两个方向各覆盖 ±30° 的方位范围。由于工作在 L 频段，该雷达可将敌我识别 (IFF) 能力集成进来，但也有可能会对 JTIDS 数据链和全球定位系统 (GPS) 等产生潜在干扰。

“楔尾”雷达的探测能力没有公开报道，但由于跟 TPS - 59 雷达频率相近、结构相似，因此可通过对比对其进行估计。首先，MESA 采用了 288 个发射组件，而 TPS - 59 采用的是 540 个，因此功率降低系数为 0.533；其次，侧视天线的孔径降低系数为 $(18 \times 6) / (30 \times 15) = 0.24$ 。在 $P_d = 0.9$ 的条件下，TPS - 59 对于 RCS 为 1m² 起伏目标的报道作用距离为 200n mile^[18]，因此同样情况下 MESA 的估算距离即为 $200 \times (0.533 \times 0.24)^{1/4} = 119.6n \text{ mile}$ 。对于端射天线阵来说，若设其方位孔径长度与天线实际长度的平方根成正比^[18]，同样可对其探测性能进行估算，此时由于孔径降低系数变为 $(\sqrt{25} \times 5) / (30 \times 15) = 0.0556$ ，那么机身纵向的估算距离就是 68.7n mile。另外，前视和后视时的方位角分辨率大约是 9°，比侧视情况下的 2.5° 要低。