

国防电子信息技术丛书


CHAPMAN & HALL/CRC

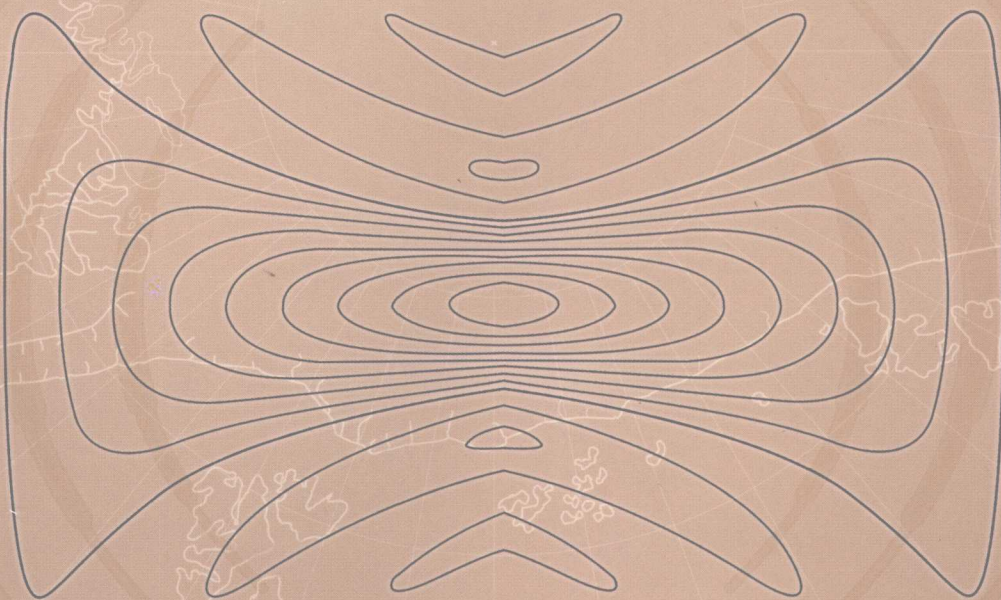
Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB
Second Edition

雷达系统分析与设计 (MATLAB版) (第二版)

[美] Bassem R. Mahafza 著

陈志杰 罗群 沈齐 主译

刘永坚 周万幸 倪嘉骊 李光伟 主校



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内容简介

国防电子信息技术丛书

雷达系统分析与设计

(MATLAB版) (第二版)

Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, Second Edition

[美] Bassem R. Mahafza 著

陈志杰 罗群 沈齐 主译

刘永坚 周万幸 倪嘉骊 李光伟 主校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

责任编辑：孙小川
地址：北京市丰台区
邮编：100071
电话：(010) 88254888
网址：http://www.phei.com.cn

ISBN 978-7-121-07118-8
I · ①号...
定价：69.00元

本书可作为高等院校电子信息工程专业及相关专业的教材，也可供从事雷达系统分析与设计的工程技术人员参考。
本书共分10章，主要介绍雷达系统分析与设计的基本原理、MATLAB在雷达系统分析与设计中的应用、雷达系统分析与设计的工程应用等。
本书可作为高等院校电子信息工程专业及相关专业的教材，也可供从事雷达系统分析与设计的工程技术人员参考。

内容简介

本书描述了雷达截面积、极化、匹配滤波器和雷达模糊函数及雷达波传播的最新进展,并给出了关于PRN码、多径和折射、高距离分辨率、杂波与MIT处理的有关内容。书中提供的MATLAB 7.0程序代码可用于雷达系统的分析和设计,具有很高的实际应用价值。无论是雷达系统入门者、研究生还是工程技术人员,都能从中获益。

本书可作为高等院校电子工程等相关专业的高年级本科生和研究生的教材与参考书,同时也是相关领域科研人员的宝贵参考资料。

Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, Second Edition by BASSEM R. MAHAFZA ISBN: 978-1-58488-532-0

Copyright © 2005 by Taylor & Francis Group LLC

Authorized translation from the English language edition published by Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

本书原版由Taylor & Francis Group出版集团出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

Publishing House of Electronics Industry is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由电子工业出版社独家出版并限在中国大陆(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)发行与销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有Taylor & Francis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:01-2007-0722

图书在版编目(CIP)数据

雷达系统分析与设计:MATLAB版:第2版/(美)马哈夫扎(Mahafza, B. R.)著;陈志杰等译.

北京:电子工业出版社,2008.10

(国防电子信息技术丛书)

书名原文:Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, Second Edition

ISBN 978-7-121-07118-8

I. 雷… II. ①马… ②陈… III. ①雷达-系统分析-计算机辅助计算-软件包, MATLAB 7.0 ②雷达-系统设计-计算机辅助计算-软件包, MATLAB 7.0 IV. TN95-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第107200号

责任编辑:冯小贝

印刷:北京市天竺颖华印刷厂

装订:三河市金马印装有限公司

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:29.5 字数:755千字

印次:2008年10月第1次印刷

定价:69.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,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。

第二版序言

在众多教师和用户的期盼下，本书的第二版终于面世了。在第二版中，我们使用了 MATLAB 07.14 版对 MATLAB 代码进行了修订和完善，并且增加了许多新程序和新函数。在保留第一版基本内容的同时，新版对部分章节和段落进行了重新编写或补充了新的素材，并在每章的结尾增加了习题。此外，第二版还修订了上一版发现的文字错误和印刷错误。

根据多位教师在选用本书第一版作为教材的过程中提出的意见和建议，我们对本书的组织结构进行了调整。例如，第一版的附录内容现已并入恰当的章节中，第 2 章和第 13 章进行了互换。这里仅列举出其中的几个例子。本书的第 1 章至第 5 章（或第 6 章）可以作为研究生水平的雷达系统分析和设计的第一阶段教程，其余章节则可以用做第二阶段的高级教程。在教学过程中，应采取理论分析与 MATLAB 即学即用即实验之间的平衡。在第一阶段的授课过程中，教师们可能更侧重于理论的讲解。但是通过实验教学，可以扩充更多的教学内容，并且能够让学生们更好地使用 MATLAB。

Bassem R. Mahafza
bmahafza@dbresearch.net
Huntsville, AL

第一版序言

关于雷达系统和雷达应用方面，人们已经撰写了大量的著作，不过这些著作中提供配套软件的并不多。因此，需要一本能够让读者即学即用、内容全面的参考书。一本理想的雷达著作不仅能向正在工作的工程师提供总结性的、详细实用的参考材料，还可以作为学生学习雷达系统分析和设计的教材。这本著作并不要求读者掌握大量的预备知识，本身就能够完全表述主题；同时应提供必要的例子和习题，特别是配有演示理论的、用户友好的软件。这套软件必须能够重新配置，以使不同用户可以改变输入的内容，以便更好地分析其相关要求和特殊要求，并增强对主题的理解。

本书的重点在于雷达的基础、原理的介绍和严格的数学推导，同时也向用户提供了一套用于分析雷达和/或设计雷达系统的 MATLAB[®] 5.0 软件。所有程序都可以接受用户的输入或使用参数的默认设置来执行。本书可以作为学生和雷达工程师分析、理解雷达系统和设计众多相关问题的有价值参考材料。本书面向研究生水平的读者，每一章都包括深刻理解雷达原理所需的数学内容和原理分析。除此之外，每一章还开发出了专用的 MATLAB 函数/程序，以进一步提高对理论的理解并提供确定雷达设计要求的原始资料。书中给出了 1190 多个方程、230 多幅插图和 200 多例子，并在每章最后提供相关的习题。选用本书作为教材使用的教师可获得解答手册。这本书的基本思路是，雷达系统不应太难以理解，又不能太难以分析和设计。

本书中给出的所有 MATLAB 程序和函数都可以从 CRC Press 网址 (www.crcpress.com) 下载。为此，可在计算机的 C 盘中创建下列目录：C:\RSA.Copy，将所有程序复制到这个目录。用户可以输入“文件名_驱动器”来执行特定的程序 GUI。本书中开发的所有 MATLAB 函数和程序包括了雷达方程式的所有形式，即脉冲压缩、时延频率转换处理、匹配滤波器、使用所有 Swerling 模型进行探测概率计算、高距离分辨力 (HRR)、阶梯频率波形分析、ghk 跟踪滤波器、卡尔曼滤波器、相控阵天线，以及其他许多的内容。

第 1 章的第一部分描述了雷达系统中最常用的术语，例如距离、距离分辨力、多普勒频率和相干性等。这一章的第二部分推导了多种形式的雷达距离方程。这部分包括低脉冲重复频率 (PRF)、高 PRF、搜索、双基地雷达和干扰下的雷达方程。这一章也简要介绍了雷达损耗。第 2 章讲解了雷达截面积 (RCS)，讨论了 RCS 与姿态角、频率和极化的关系。同时还推导了目标散射矩阵，并给出多种单个目标的 RCS 公式。最后，第 2 章讨论了复杂目标的 RCS 并引入了目标起伏模型。第 3 章讨论连续波 (CW) 雷达和脉冲雷达，并在本章中推导连续波雷达方程。同时，本章也详细讨论了如何解距离和多普勒模糊。

第 4 章概述雷达探测概率的计算方法和相关主题。包括 Swerling I、II、III 和 IV 模型在内的起伏目标探测方法都在本章进行了表述和分析。同时第 4 章也介绍了相干和非相干积

① 本书中提供的所有 MATLAB 函数和程序都是用 MATLAB5.0-R11 开发的，该软件带有信号处理工具箱，可运行在装有 Windows 98 操作系统的 PC 上。

累。本章中还包括分析探测的累积概率。第 5 章回顾了雷达波形, 包括 CW、脉冲波形和 LFM, 同时也分析了 HRR 波形和步进频率波形。

匹配滤波器的概念和雷达模糊函数是第 6 章的内容, 本章对包括相干脉冲串模糊函数在内的许多重大结果进行了详细推导。第 7 章讨论了脉冲压缩, 同时也详细介绍了模拟和数字脉冲压缩, 包括快速卷积和时频转换处理器。最后, 本章还介绍了二进制相位编码和频率码。

第 8 章介绍了雷达波传播的现象学, 主要包括多路径、折射、衍射、发散和大气衰减等。第 9 章给出了杂波和动目标显示 (MTI) 的概念, 同时定义了表面杂波和体杂波并推导了相关的雷达方程。最后, 本章分析了降低杂波影响的延迟线对消器的情况。

第 10 章简要介绍了雷达天线, 内容包括线性和平面相控阵并讨论了常规波束的形成方法。第 11 章介绍目标跟踪雷达系统。这章中的第一部分是单目标跟踪, 详细介绍了时序波束转换、圆锥扫描、单脉冲和距离跟踪等内容。第二部分介绍多目标跟踪技术, 详细描述了 $\alpha\beta$ 滤波器和 $\alpha\beta\gamma$ 滤波器等固定增益跟踪滤波器, 并引入了卡尔曼滤波器的概念, 同时深入分析了卡尔曼滤波器的某些特殊情况。

第 12 章的主题是合成孔径雷达 (SAR), 内容包括 SAR 信号处理、SAR 设计考虑事项及 SAR 雷达方程式。同时本章也讨论了以时序模式工作的阵列。第 13 章对信号处理进行了概述。

MATLAB 是 The MathWorks 公司的注册商标。

产品信息请联系:

The MathWorks 公司

3 Apple Hill Drive

Natick, MA 01760-2098 USA

Tel: 508-647-7000

Fax: 508-647-7001

E-mail: info@mathworks.com

Web: www.mathworks.com

Bassem R. Mahafza

Huntsville, Alabama

目 录

第 1 章	雷达基本原理	(1)
1.1	雷达分类	(1)
1.2	距离	(3)
1.3	距离分辨力	(6)
1.4	多普勒频率	(8)
1.5	相干性	(14)
1.6	雷达方程式	(15)
1.7	低 PRF 雷达方程	(20)
1.8	高 PRF 雷达方程	(23)
1.9	监视雷达方程	(25)
1.10	带干扰的雷达方程	(29)
1.11	自屏蔽干扰器 (SSJ)	(30)
1.12	远距离干扰器 (SOJ)	(38)
1.13	距离缩减因子	(40)
1.14	双基地雷达方程	(40)
1.15	雷达损耗	(42)
1.16	噪声系数	(46)
1.17	MATLAB 程序清单	(50)
	习题	(54)
第 2 章	信号处理	(57)
2.1	信号分类和系统分类	(57)
2.2	傅里叶变换	(58)
2.3	傅里叶级数	(60)
2.4	卷积积分与相关积分	(61)
2.5	能量谱密度和功率谱密度	(62)
2.6	随机变量	(65)
2.7	多变量高斯分布	(67)
2.8	随机过程	(69)
2.9	采样定理	(70)
2.10	Z 变换	(71)
2.11	离散傅里叶变换	(73)

2.12	离散功率谱	(74)
2.13	加窗技术	(75)
2.14	有用的表格和公式	(79)
	习题	(81)
第 3 章	连续波和脉冲雷达	(84)
3.1	功能框图	(84)
3.2	连续波雷达方程	(85)
3.3	频率调制	(86)
3.4	线性调频 (LFM) 连续波雷达	(89)
3.5	多频连续波雷达	(91)
3.6	脉冲雷达	(92)
3.7	距离和多普勒模糊	(94)
3.8	解距离模糊	(94)
3.9	解多普勒模糊	(96)
3.10	MATLAB 程序 “range_calc.m”	(98)
	习题	(100)
第 4 章	雷达探测	(103)
4.1	出现噪声时的探测	(103)
4.2	虚警概率	(106)
4.3	探测概率	(107)
4.4	脉冲积累	(111)
4.5	起伏目标的检测	(116)
4.6	探测概率计算	(121)
4.7	Swerling V 目标的探测	(121)
4.8	Swerling I 目标的探测	(123)
4.9	Swerling II 目标的探测	(126)
4.10	Swerling III 目标的探测	(128)
4.11	Swerling IV 目标的探测	(129)
4.12	雷达方程回顾	(132)
4.13	累积探测概率	(136)
4.14	恒虚警率 (CFAR)	(138)
4.15	MATLAB 程序清单	(141)
	习题	(146)
第 5 章	雷达波形	(149)
5.1	低通、带通信号和正交分量	(149)
5.2	解析信号	(150)
5.3	连续波和脉冲波形	(151)

5.4	线性调频波形	(154)
5.5	高距离分辨力	(159)
5.6	步进频率波形	(159)
5.7	MATLAB 程序清单	(168)
	习题	(169)
第 6 章	匹配滤波器和雷达模糊函数	(170)
6.1	匹配滤波器信噪比	(170)
6.2	副本	(173)
6.3	LFM 波形的匹配滤波器响应	(173)
6.4	波形分辨力和模糊	(175)
6.5	雷达模糊函数	(179)
6.6	模糊函数的例子	(180)
6.7	LFM 模糊函数	(183)
6.8	相干脉冲串模糊函数	(188)
6.9	模糊图等值线	(192)
6.10	频率编码 (Costas 码)	(194)
6.11	二进制相位编码	(196)
6.12	Frank 码	(203)
6.13	伪随机 (PRN) 编码	(204)
6.14	MATLAB 程序清单	(209)
	习题	(211)
第 7 章	脉冲压缩	(214)
7.1	时间-带宽乘积	(214)
7.2	脉冲压缩的雷达方程	(215)
7.3	线性调频脉冲压缩	(215)
7.4	相关处理器	(217)
7.5	扩展处理器	(224)
7.6	由目标速度引起的失真	(230)
7.7	距离多普勒耦合	(232)
7.8	MATLAB 程序清单	(233)
	习题	(234)
第 8 章	雷达波的传播	(235)
8.1	地球大气层	(235)
8.2	折射	(236)
8.3	四分之三地球模型	(240)
8.4	地面反射	(241)
8.5	方向图传播因子	(248)

8.6	衍射	(258)
8.7	大气衰减	(258)
	习题	(259)
第 9 章	杂波和动目标显示 (MTI)	(261)
9.1	杂波的定义	(261)
9.2	表面杂波	(261)
9.3	体杂波	(271)
9.4	杂波统计模型	(273)
9.5	杂波谱	(274)
9.6	动目标显示 (MTI)	(275)
9.7	单延迟线对消器	(276)
9.8	双延迟线对消器	(278)
9.9	带有反馈回路 (递归滤波器) 的延迟线	(280)
9.10	PRF 参差	(281)
9.11	MTI 改善因子	(283)
9.12	杂波下的可见度 (SCV)	(287)
9.13	有最佳权重的延迟线对消器	(287)
9.14	MATLAB 程序清单	(289)
	习题	(291)
第 10 章	雷达天线	(294)
10.1	方向性、功率增益和有效孔径	(294)
10.2	近场和远场	(295)
10.3	通用阵列	(296)
10.4	线性阵列天线	(298)
10.5	平面阵列	(309)
10.6	阵列天线扫描损失	(331)
10.7	常规的波束形成	(333)
10.8	MATLAB 程序清单	(335)
	习题	(336)
第 11 章	目标跟踪	(338)
11.1	角度跟踪	(338)
11.2	幅度比较单脉冲	(342)
11.3	相位比较单脉冲	(348)
11.4	距离跟踪	(349)
11.5	边搜索边跟踪 (TWS)	(350)
11.6	LTI 系统的状态变量表示法	(352)
11.7	感兴趣的 LTI 系统	(355)

11.8	固定增益跟踪滤波器	(356)
11.9	卡尔曼滤波器	(369)
11.10	MATLAB 程序和函数列表	(377)
	习题	(379)
第 12 章	合成孔径雷达 (SAR)	(381)
12.1	引言	(381)
12.2	真实阵列与合成阵列	(381)
12.3	侧视 SAR 的几何关系	(383)
12.4	SAR 设计上的考虑	(384)
12.5	SAR 雷达方程	(389)
12.6	SAR 信号处理	(389)
12.7	侧视 SAR 多普勒处理	(390)
12.8	利用多普勒处理进行 SAR 成像	(393)
12.9	距离移动	(393)
12.10	案例研究	(393)
12.11	以序列模式工作的阵列	(394)
12.12	MATLAB 程序	(399)
	习题	(399)
第 13 章	雷达截面积 (RCS)	(401)
13.1	RCS 定义	(401)
13.2	RCS 和姿态角及频率的依赖关系	(402)
13.3	RCS 与极化的依赖关系	(406)
13.4	简单物体的 RCS	(409)
13.5	计算复杂目标的雷达截面积 (RCS) 的简化方法	(430)
13.6	RCS 的起伏和统计模型	(431)
13.7	RCS 预测方法	(433)
13.8	计算电磁学	(433)
13.9	有限差分时间域方法	(434)
13.10	有限元法	(438)
13.11	积分方程	(439)
13.12	几何光学	(440)
13.13	物理光学	(440)
13.14	边缘衍射	(444)
13.15	多次反射	(444)
	习题	(445)
第 14 章	MATLAB 程序和函数的名称列表	(447)
	参考文献	(451)

第1章 雷达基本原理

1.1 雷达分类

雷达 (Radar) 是无线电探测和定位 (RADio Detection And Ranging) 几个英文单词的缩写。通常, 雷达系统使用调制的波形和定向天线向空间中的特定空域发射电磁波以搜索目标。搜索空域内的物体 (目标) 把能量的一部分 (雷达返回或回波) 反射回雷达。然后, 雷达接收机处理这些回波, 从中提取距离、速度、角度位置和其他目标识别特征等目标信息。

雷达可以分为陆基、机载、星载或舰载雷达系统, 也可以按照雷达的具体特征分成多种类别, 例如根据使用的频带、天线类型和使用的波形等来分类。其他的分类方法主要是与雷达的任务和/或功能有关, 这包括气象、截获和搜索、跟踪、边搜索边跟踪、火控、预警、超视距、地形跟随和地形回避雷达等。相控阵雷达使用相控阵天线, 通常称为多功能 (多模式) 雷达。相控阵是由两个或更多个基本辐射单元组成的天线。阵列天线合成机械转动的或电子转动的窄定向波束。通过控制馈给阵列各单元电流的相位可以实现电扫描, 因此取名相控阵。

雷达经常按照其使用的波形类型或工作频率分类。如果先考虑雷达波形, 则雷达可以分为连续波 (CW) 雷达或脉冲雷达 (PR)。CW 雷达就是连续发射电磁能量并使用分开的发射天线和接收天线的雷达。未经调制的 CW 雷达可以精确测量目标的径向速度 (多普勒频移) 和角度位置。如果不使用某些形式的调制, 就无法提取出目标的距离信息。未经调制的 CW 雷达主要用于目标速度搜索、跟踪及导弹引导等。脉冲雷达使用脉冲波形串 (主要是经过调制的)。在这种分类中, 雷达系统可以按照脉冲重复频率 (PRF) 分为低 PRF 雷达、中 PRF 雷达和高 PRF 雷达。低 PRF 雷达主要用于目标速度 (多普勒频移) 次要时的测距。高 PRF 主要用于测量目标速度。连续波雷达和脉冲雷达都可以通过使用不同的调制方案来测量目标距离和径向速度。表 1.1 列出了雷达按照工作频率分类的情况。

表 1.1 雷达频带

字母名称	频率 (GHz)	新频带名称 (GHz)
HF	0.003 ~ 0.03	A
VHF	0.03 ~ 0.3	A < 0.25; B > 0.25
UHF	0.3 ~ 1.0	B < 0.5; C > 0.5
L 波段	1.0 ~ 2.0	D
S 波段	2.0 ~ 4.0	E < 3.0; F > 3.0
C 波段	4.0 ~ 8.0	G < 6.0; H > 6.0
X 波段	8.0 ~ 12.5	I < 10.0; J > 10.0
Ku 波段	12.5 ~ 18.0	J
K 波段	18.0 ~ 26.5	J < 20.0; K > 20.0
Ka 波段	26.5 ~ 40.0	K
MMW	通常大于 34.0	L < 60.0; M > 60.0

高频(HF)雷达使用电离层对电磁波的反射来探测超出地平线的目标。高频雷达的例子包括美国使用的工作在5~28 MHz频段内的超视距后向散射(U.S.OTH/B)雷达、美国海军使用的可再定位超视距雷达(ROTHR)(见图1.1),以及俄罗斯使用的“啄木鸟”雷达。甚高频(VHF)和超高频(UHF)频段用于超远距离的预警雷达(EWR),例如工作在245 MHz(见图1.2)的弹道导弹预警系统(BMEWS)搜索和跟踪单脉冲雷达、超远距离多功能相控阵雷达——边境截获雷达(PAR)及PAVE PAWS(“铺路爪”)多功能UHF相控阵预警雷达。由于超远距离测量需要非常长的波长和很高的灵敏度,所有这类雷达都需要大的孔径。

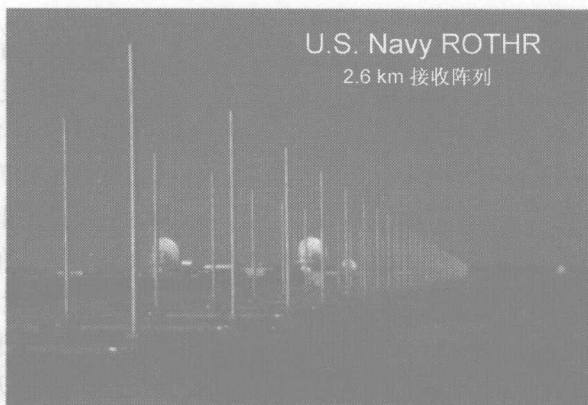


图 1.1 美国海军使用的超视距雷达



图 1.2 英国费林达勒斯的 BMEWS

L波段雷达主要是用于远距离军事和空中交通管制中搜索应用的陆基和舰载系统。大多数陆基和舰载中程雷达工作在S波段,例如,用于空中交通管制的机场监视雷达(ASR)和美国海军舰载“宙斯盾”(AEGIS)多功能相控阵雷达(见图1.3)都是S波段的。图1.4的机载预警和控制系统(AWACS)与美国国家气象局的下一代多普勒气象雷达是S波段的雷达。但是,大多数气象雷达系统是C波段的雷达,中程搜索和火控军用雷达与精密测量雷达也都是C波段的。

当天线尺寸受到物理条件的限制时,雷达系统采用X波段。这样的雷达系统包括大多数军用的多工作模式机载雷达。如果雷达系统需要良好的目标探测性能,同时又不能容许较高频段的大气衰减的影响,则也可以采用X波段。更高频段(Ku、K和Ka)受到非常严重

的天气和大气衰减的影响。因此，使用这些频段的雷达系统仅用在短距离内，例如警用交通雷达、近距离地形回避雷达和地形跟随雷达。毫米波（MMW）雷达主要用于极短距离内的射频寻的器和实验雷达系统。

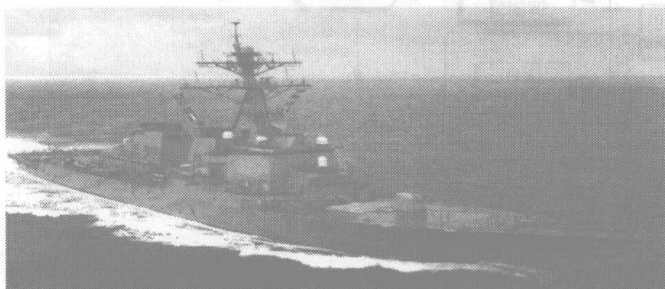


图 1.3 美国海军的“宙斯盾”

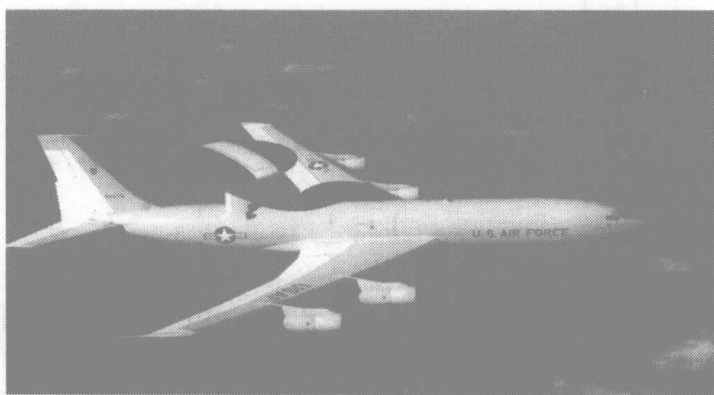


图 1.4 美国空军的 AWACS

1.2 距离

图 1.5 给出了简化的脉冲雷达框图。时间控制方框产生整个系统所需的同步定时信号。调制器/发射机方框产生调制信号并将其送到天线。双工器控制发射模式和接收模式之间的天线转接。双工器可使一副天线同时用于发射和接收。在发射过程中，双工器把雷达的电磁能量引向天线；而在接收期间，则把接收到的雷达回波引向接收机。接收机把雷达返回信号进行放大，随即准备进行信号处理。信号处理器方框进行目标信息的提取。目标距离 R 可以通过测量时间延迟 Δt 来计算， Δt 是脉冲在雷达与目标之间往返所花费的时间。由于电磁波以光速 $c = 3 \times 10^8$ m/s 传播，所以

$$R = \frac{c\Delta t}{2} \quad (1.1)$$

式中， R 的单位是 m（米）， Δt 的单位是 s（秒）。因子 1/2 用于考虑往返的时间延迟。

通常，脉冲雷达发射和接收一串脉冲，如图 1.6 所示。脉冲之间的周期（IPP）为 T ，脉冲宽度为 τ 。IPP 通常被标为脉冲重复间隔（PRI）。PRI 的倒数就是 PRF，PRF 用 f_r 表示：

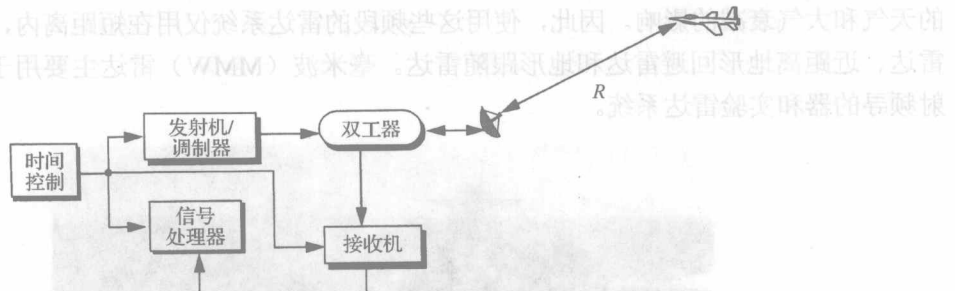


图 1.5 简化的脉冲雷达框图

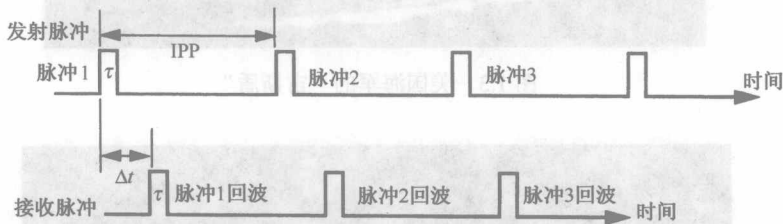


图 1.6 发射脉冲串和接收脉冲串

$$f_r = \frac{1}{PRI} = \frac{1}{T} \quad (1.2)$$

在每次 PRI 期间, 雷达仅发射能量 τ 秒, 在余下的 PRI 中等待目标回波。雷达发射占空因子 d_t 的定义是比值 $d_t = \tau/T$ 。雷达平均发射功率是

$$P_{av} = P_t \times d_t \quad (1.3)$$

式中, P_t 表示雷达峰值发射功率。脉冲能量 $E_p = P_t \tau = P_{av} T = P_{av} / f_r$ 。

与往返时间延迟 T 对应的距离称为雷达的非模糊距离 R_u 。考虑图 1.7 中所示的情况。回波 1 表示由脉冲 1 从距离雷达 $R_1 = c \Delta t / 2$ 的目标产生的雷达回波。回波 2 可以解释为由脉冲 2 从相同目标产生的回波, 或者也可能是由脉冲 1 在距离目标为 R_2 的更远距离产生的回波。在这种情况下,

$$R_2 = \frac{c \Delta t}{2} \quad \text{或} \quad R_2 = \frac{c(T + \Delta t)}{2} \quad (1.4)$$

显然, 回波 2 带有距离模糊。因此, 雷达一旦发射了脉冲就必须等待足够长的时间, 以便能在下一次脉冲发射前接收到最远距离目标的回波。由此, 最大无模糊距离必须对应于 PRI 的一半:

$$R_u = c \frac{T}{2} = \frac{c}{2f_r} \quad (1.5)$$

例: 某机载脉冲雷达的峰值功率 $P_t = 10 \text{ kW}$, 使用两种 PRF, $f_{r1} = 10 \text{ kHz}$, $f_{r2} = 30 \text{ kHz}$ 。如果平均发射功率 P_{av} 为常数并等于 1500 W 时, 每种 PRF 的脉冲宽度是多少? 计算每种情况下的脉冲能量。

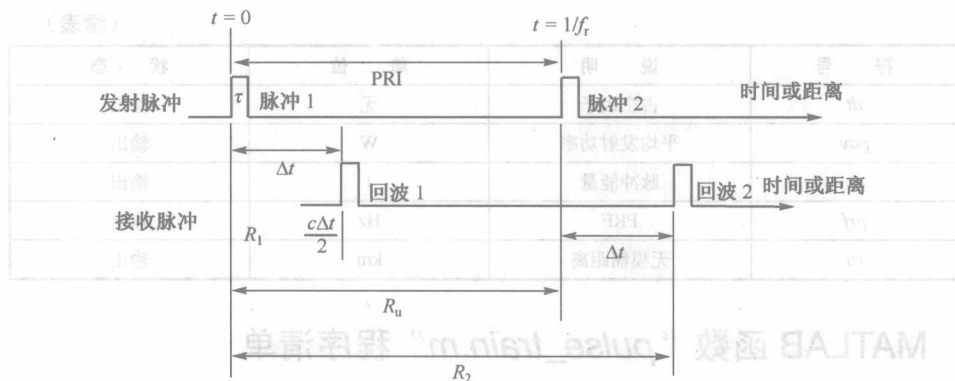


图 1.7 图示距离模糊

解: 由于 P_{av} 是常数, 所有两种 PRF 具有相同的占空因子。更确切地说,

$$d_t = \frac{1500}{10 \times 10^3} = 0.15$$

脉冲重复间隔是

$$T_1 = \frac{1}{10 \times 10^3} = 0.1 \text{ ms}$$

$$T_2 = \frac{1}{30 \times 10^3} = 0.0333 \text{ ms}$$

由此

$$\tau_1 = 0.15 \times T_1 = 15 \text{ } \mu\text{s}$$

$$\tau_2 = 0.15 \times T_2 = 5 \text{ } \mu\text{s}$$

$$E_{p1} = P_t \tau_1 = 10 \times 10^3 \times 15 \times 10^{-6} = 0.15 \text{ J}$$

$$E_{p2} = P_t \tau_2 = 10 \times 10^3 \times 5 \times 10^{-6} = 0.05 \text{ J}$$

1.2.1 MATLAB 函数 “pulse_train.m”

MATLAB 函数 “pulse_train.m” 计算占空因子、平均发射功率、脉冲能量和脉冲重复频率。语法如下:

$$[dt, pav, ep, prf, ru] = pulse_train(\tau, pri, p_peak)$$

其中:

符号	说明	单位	状态
τ	脉冲宽度	s	输入
pri	PRI	s	输入
p_peak	峰值功率	W	输入

(续表)

符号	说明	单位	状态
dt	占空因子	无	输出
pav	平均发射功率	W	输出
ep	脉冲能量	J	输出
prf	PRF	Hz	输出
ru	无模糊距离	km	输出

1.2.2 MATLAB 函数 “pulse_train.m” 程序清单

```
function [dt, prf, pav, ep, ru] = pulse_train(tau, pri, p_peak)
c = 3.0e+8; % speed of light
dt = tau / pri;
prf = 1. / pri;
pav = p_peak * dt;
ep = p_peak * tau;
ru = 1.0e-3 * c * pri / 2.0;
return
```

1.3 距离分辨力

距离分辨力(用 ΔR 表示)是雷达的一种量度,用于描述雷达分别探测出相邻目标的能力。雷达系统通常设计成在最小距离 R_{\min} 和最大距离 R_{\max} 之间工作。 R_{\min} 和 R_{\max} 之间的距离分为 M 个距离仓(门),每个宽度为 ΔR ,

$$M = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{\Delta R} \quad (1.6)$$

间隔至少为 ΔR 的目标可以在距离上完全分辨出来,如图1.8所示。在相同距离门之内的目标可以使用信号处理技术分辨出横向距离(方位角)。

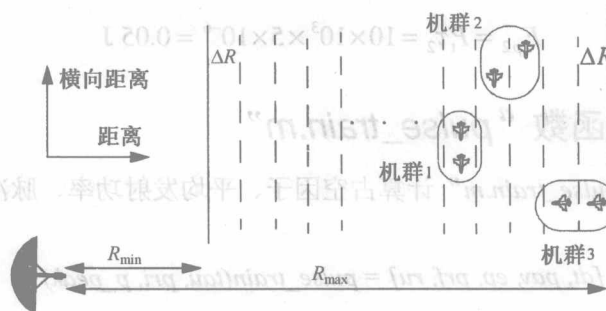


图 1.8 在距离和横向距离上分辨目标

考虑位于 R_1 和 R_2 的两个目标,分别对应的时间延迟为 t_1 和 t_2 。距离差 ΔR 为

$$\Delta R = R_2 - R_1 = c \frac{(t_2 - t_1)}{2} = c \frac{\delta t}{2} \quad (1.7)$$