



CRC Press  
Taylor & Francis Group



国防电子信息技术丛书

MATLAB Simulations for Radar Systems Design

# 雷达系统设计 MATLAB仿真

[美] Bassem R. Mahafza 著  
Atef Z. Elsherbeni

朱国富 黄晓涛 黎向阳 李悦丽 译  
周智敏 审校



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>

国防电子信息技术丛书

# 雷达系统设计 MATLAB 仿真

MATLAB Simulations for Radar Systems Design

[美] Bassem R. Mahafza 著  
Atef Z. Elsherbeni

朱国富 黄晓涛 黎向阳 李悦丽 译

周智敏 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地讲述了雷达系统分析和设计的全过程,并有一个完整的设计案例贯穿于全书,同时各章分别还有一些小型实例。本书的主要内容包括:雷达基础导论、雷达检测、雷达波形、雷达模糊函数、脉冲压缩、面杂波与体杂波、动目标显示和杂波抑制、相控阵、目标跟踪、电子对抗、雷达截面积、高分辨率战术合成孔径雷达、信号处理等。所有 MATLAB 代码和函数均可从网站获得。

本书可作为高等院校电子工程专业高年级本科生和研究生的参考教材,也可作为在雷达系统领域工作的雷达工程师和技术人员的参考书。

MATLAB Simulations for Radar Systems Design, by Bassem R. Mahafza, Atef Z. Elsherbeni

ISBN: 9781584883920

Copyright © 2004 by Taylor & Francis Group, LLC

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

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.

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

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版。版权所有,侵权必究。本书中文简体翻译版授权由电子工业出版社独家出版并仅限在中国大陆地区销售。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。

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: 01-2007-1179

### 图书在版编目(CIP)数据

雷达系统设计 MATLAB 仿真/(美)马哈夫扎(Mahafza, B. R.), (美)埃尔舍贝利(Elsherbeni, A. Z.)著; 朱国富等译. —北京:电子工业出版社, 2016. 7

(国防电子信息技术丛书)

书名原文: MATLAB Simulations for Radar Systems Design

ISBN 978-7-121-28966-8

I. ①雷… II. ①马… ②埃… ③朱… III. ①Matlab 软件-应用-雷达-系统设计-高等学校-教材  
IV. ①TN95-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 124609 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 马 岚

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

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: 28.75 字数: 736 千字

版 次: 2016 年 7 月第 1 版

印 次: 2016 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 89.00 元

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, 88258888。

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。

本书咨询联系方式: classic-series-info@phei.com.cn。

## 译者序

雷达是一种全天时、全天候的传感器,可以安装在车辆、飞机和卫星等多种平台上,在军事和民用等方面都具有重要的应用价值,因此一直受到世界各国的高度重视。仿真是现代雷达系统设计成功的基础,从这一点来说,毫无疑问,没有任何软件比 MATLAB 更好。

经过改革开放几十年的发展,我国在雷达领域取得了长足的进步,特别是最近十几年,随着国家的不断投入,我国的雷达事业进入了一个快速发展的时期。在实际工作中,无论是雷达系统研制人员,还是雷达信号处理人员,都希望有一本系统全面地介绍雷达系统及其仿真的专著,在学习雷达系统基本知识的同时,能够进行仿真实践,以增强理解。Bassem R. Mahafza 和 Atef Z. Elsherbini 合著的这本书完全可以满足读者的这种需求。

Mahafza 博士是公认的雷达学科的专家,具有近 30 年的丰富经验,发表了 60 多篇论文和 100 多篇技术报告,出版了 4 部雷达专著,本书是其中的代表之作。为了推动我国雷达技术的发展,我们组织翻译了本书。本书重点是雷达系统设计,然而本书还提供了坚实的理论,使读者具备必要的背景知识,以便进行雷达系统分析。本书组织的目的是讲授一种概念性的设计过程及相关的折中分析和计算。本书可作为工作在雷达系统领域的雷达工程师的工程参考书。本书所提供的 MATLAB 代码可为用户提供雷达系统分析和设计的手把手的经验。

全书共分为两大部分,包含 14 章和 5 个附录,其中第 1 章、第 2 章、第 10 章、第 11 章和第 14 章及附录 1A 和 1B 由朱国富翻译,第 6 章至第 9 章由黄晓涛翻译,第 3 章至第 5 章由黎向阳翻译,第 12 章和第 13 章及附录 13A,13B 和 13C 由李悦丽翻译。另外参与翻译工作的还有博士研究生贺峰、刘博、赵志勇和耿世磊。朱国富完成了全书的统稿工作,周智敏教授对全书进行了审校。国防科技大学的有关专家对本书进行了审阅,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢!

本书的译者都是多年工作在雷达技术领域的一线研究人员,具有丰富的实践经验,但是雷达系统涉及的知识面很广,因此我们对于原著内容的理解难免会有偏差,翻译不当之处,希望得到各位同行和专家的批评指正。

第8章详细分析了相控阵。仔细研究了线性阵列,并且开发了计算和绘制相关阵列方向图的 MATLAB 代码;还介绍了具有各种格点配置的面阵列。

第9章讨论了目标跟踪雷达系统。本章的第一部分是单目标跟踪。详细讨论了顺序波瓣法、圆锥扫描、单脉冲和距离跟踪等主题。本章第二部分介绍了多目标跟踪技术,详细介绍了固定增益跟踪滤波器,如  $\alpha\beta$  和  $\alpha\beta\gamma$  滤波器;介绍了卡尔曼滤波器的概念;深入分析了卡尔曼滤波器的特殊情况。

第10章是与阿拉巴马州亨斯维尔的美国陆军空间和导弹防御司令部的 Michael Madewell 先生合著的。本章概述了电子对抗(ECM)技术,介绍了自屏蔽和远距离干扰等主题,还分析了雷达箔条,介绍了一种用于弹道导弹防御(BMD)的箔条抑制技术。

第11章关注于雷达截面积(RCS);讨论了 RCS 与视角、频率和极化的关系;研究了目标散射矩阵;介绍了很多简单目标的 RCS;讨论了复杂目标的 RCS;介绍了目标起伏模型。

第12章是与阿拉巴马州红石兵工厂的美国陆军航空和导弹全寿命管理司令部(AMCOM)的 Brian Smith 博士合著的。本章介绍了战术合成孔径雷达(SAR)的主题。本章的主题包括:SAR 信号处理、SAR 设计和 SAR 雷达方程。最后,第13章概述了信号处理。

任何实体或个人都可以随意使用本书提供的材料和本书作者设计的 MATLAB 代码。作者和出版商对使用本书可能造成的任何物质或非物质损失、人身或任何种类的财产损失、任意的和所有的其他类型的损失,不承担义务和责任。

## 致 谢

作者首先感谢上帝给了我们耐心和毅力完成这项工作。非常感谢我们的家庭,为了让我们完成此书,他们放弃和牺牲了很多时间。作者还要感谢所有的同事和朋友,在本书的准备期间得到了他们很多支持。特别感谢 Brian Smith、James Michael Madewell、Patrick Barker、David Hall、Mohamed Al-Sharkawy 和 Matthew Inman,他们合著了本书,或者审校了其中的一些内容。

# 前 言

《雷达系统设计 MATLAB 仿真》的重点是雷达系统设计。然而,本书提供了坚实的理论,使读者具备必要的背景知识以进行雷达系统分析。撰写本书的目的是讲授一种概念性的设计过程及相关的折中分析和计算。本书可作为工作在雷达系统领域的雷达工程师的工程参考书。本书所提供的 MATLAB 代码可为用户提供雷达系统分析和设计的手把手的经验。

第 1 章引入了一个雷达设计案例研究,并且贯穿全书,详细介绍和分析了作者如何设计这部雷达,还进行了折中分析和计算。另外,在本书中还有几个小型的设计案例。

《雷达系统设计 MATLAB 仿真》分为两部分:第一部分提供了对雷达系统分析和设计的完整描述。第 1 章引入了一个贯穿全书的设计案例研究。每一章都基于本书当前所涵盖的理论,从作者的观点介绍如何设计案例研究中的雷达。随着本书讲述内容的深入,讨论了新的理论,并且设计案例研究的要求会变化或更新,设计的复杂性也会增加。为了这个目的,开发了一整套 MATLAB 6 仿真程序来支持这个开发过程。这部分对学生和雷达工程师而言是很有价值的,可帮助他们理解雷达系统及其设计过程,包括:(1)学习如何选择不同的雷达参数,以满足设计需求;(2)在雷达大小、工作模式、频率选择、波形和信号处理之间进行详细的折中分析;(3)建立和开发与设计有关的损失和误差预算;(4)形成雷达工作和设计方法的深刻理解。另外,第一部分的各章包含几个贴切的小型设计案例研究,以帮助增强对利用各章所介绍的材料进行雷达设计的理解。

第二部分的几章涵盖了专门的雷达主题,其中一些是与该领域的其他专家一起编著或合著的。第二部分的材料是想通过所提供的这些与雷达主题相关的详细和全面的观点,来进一步增强对雷达系统分析的理解。

本书中的 MATLAB 函数和程序包括所有形式的雷达方程:脉冲压缩、去斜处理、匹配滤波器、所有 Swerling 模型的检测概率的计算、高距离分辨率(HRR)、步进频波形分析、ghk 跟踪滤波器、卡尔曼滤波器、相控阵天线、杂波计算、雷达模糊函数、ECM、箔条,等等。相关代码的下载网址为 [www.crcpress.com/product/isbn/9781584883920](http://www.crcpress.com/product/isbn/9781584883920)。在网页上点击 Downloads/Updates 即可找到可下载文件。

第 1 章描述了雷达系统中最常用的术语,如距离、距离分辨率和多普勒频率。本章开发了雷达距离方程,最后介绍了命名为“‘我的雷达’设计案例研究”的案例。第 2 章提供了雷达检测概率的计算及其相关主题的概述;介绍和分析了包括 Swerling I、II、III 和 IV 模型的起伏目标的检测;还介绍了相干和非相干积累,分析了积累检测概率,介绍了“我的雷达”设计案例研究——实习 2。

第 3 章回顾了雷达波形,包括 CW、脉冲和 LFM;分析了高距离分辨率(HRR)波形和步进频波形;介绍和分析了匹配滤波器(MF)的概念。第 4 章详细介绍了与雷达模糊函数有关的原理,包括单个脉冲、线性调频脉冲、无调制脉冲串、巴克码和 PRN 码的模糊函数。第 5 章介绍了脉冲压缩,分析了 MF 和去斜处理器。

第 6 章包含杂波概念的处理,包括面杂波和体杂波。第 7 章介绍了使用动目标显示(MTI)的杂波抑制,分析了抑制杂波影响的延迟线对消器的实现方式。

# 目 录

## 第 一 部 分

第 1 章 雷达基础导论 .....	1
1.1 雷达分类 .....	1
1.2 距离 .....	2
1.3 距离分辨率 .....	3
1.4 多普勒频率 .....	4
1.5 雷达方程 .....	8
1.6 搜索(警戒) .....	13
1.7 脉冲积累 .....	17
1.8 雷达损失 .....	23
1.9 “我的雷达”设计案例研究——实习 1 .....	26
1.10 MATLAB 程序和函数清单 .....	31
附录 1A 脉冲雷达 .....	39
附录 1B 噪声系数 .....	45
第 2 章 雷达检测 .....	49
2.1 噪声中的检测 .....	49
2.2 虚警概率 .....	51
2.3 检测概率 .....	52
2.4 脉冲积累 .....	54
2.5 起伏目标的检测 .....	59
2.6 检测概率的计算 .....	62
2.7 修正的雷达方程 .....	68
2.8 检测累积概率 .....	70
2.9 恒虚警率(CFAR) .....	72
2.10 “我的雷达”设计案例研究——实习 2 .....	74
2.11 MATLAB 程序及函数清单 .....	77
第 3 章 雷达波形 .....	97
3.1 低通、带通信号和正交分量 .....	97
3.2 解析信号 .....	98
3.3 连续和脉冲波形 .....	98
3.4 线性调频波形 .....	101



3.5	高距离分辨率	105
3.6	步进频波形	105
3.7	匹配滤波器	112
3.8	副本	115
3.9	LFM 波形的匹配滤波器响应	115
3.10	波形分辨率和模糊	116
3.11	“我的雷达”设计案例研究——实习 3	119
3.12	MATLAB 程序和函数清单	122
<b>第 4 章</b>	<b>雷达模糊函数</b>	<b>126</b>
4.1	简介	126
4.2	模糊函数的例子	126
4.3	模糊函数等高图	136
4.4	数字编码波形	138
4.5	“我的雷达”设计案例研究——实习 4	148
4.6	MATLAB 程序和函数清单	149
<b>第 5 章</b>	<b>脉冲压缩</b>	<b>157</b>
5.1	时间带宽积	157
5.2	脉冲压缩的雷达方程	157
5.3	LFM 脉冲压缩	158
5.4	“我的雷达”设计案例研究——实习 5	171
5.5	MATLAB 程序和函数清单	174
<b>第 6 章</b>	<b>面杂波与体杂波</b>	<b>179</b>
6.1	杂波的概念	179
6.2	面杂波	179
6.3	体杂波	187
6.4	杂波统计模型	189
6.5	“我的雷达”设计案例研究——实习 6	189
6.6	程序及函数清单	192
<b>第 7 章</b>	<b>动目标显示和杂波抑制</b>	<b>196</b>
7.1	杂波谱	196
7.2	动目标显示(MTI)	196
7.3	单延迟线对消器	198
7.4	双延迟线对消器	199
7.5	反馈延迟线对消器(递归滤波器)	201
7.6	重频参差	202
7.7	MTI 改善因子	204
7.8	“我的雷达”设计案例研究——实习 7	207

7.9	MATLAB 程序及函数清单	209
<b>第 8 章</b>	<b>相控阵</b>	<b>213</b>
8.1	方向增益、功率增益及有效孔径	213
8.2	近场和远场	214
8.3	一般阵列	215
8.4	线性阵列	216
8.5	平面阵列	227
8.6	阵列扫描损耗	249
8.7	“我的雷达”设计案例研究——实习 8	251
8.8	MATLAB 程序及函数清单	252
<b>第 9 章</b>	<b>目标跟踪</b>	<b>270</b>
9.1	角跟踪	270
9.2	比幅单脉冲	273
9.3	比相单脉冲	278
9.4	距离跟踪	280
9.5	边扫描边跟踪(TWS)	280
9.6	LTI 系统的状态变量表示法	281
9.7	感兴趣的 LTI 系统	284
9.8	固定增益跟踪滤波器	285
9.9	卡尔曼滤波器	297
9.10	“我的雷达”设计案例研究——实习 9	302
9.11	MATLAB 程序及函数清单	309

## 第二部分

<b>第 10 章</b>	<b>电子对抗(ECM)</b>	<b>317</b>
10.1	简介	317
10.2	干扰机	317
10.3	距离减小因子	324
10.4	箔条	326
10.5	MATLAB 程序和函数清单	332
<b>第 11 章</b>	<b>雷达截面积(RCS)</b>	<b>337</b>
11.1	RCS 定义	337
11.2	RCS 预测方法	338
11.3	与视角和频率的关系	339
11.4	RCS 与极化的关系	342
11.5	简单物体的 RCS	346
11.6	戴介质帽的楔的散射	359
11.7	复杂目标的 RCS	372
11.8	RCS 起伏和统计模型	373

11.9	MATLAB 程序和函数清单 .....	375
<b>第 12 章</b>	<b>高分辨率战术合成孔径雷达 .....</b>	<b>399</b>
12.1	简介 .....	399
12.2	侧视 SAR 几何关系 .....	399
12.3	SAR 的设计考虑 .....	401
12.4	SAR 雷达方程 .....	405
12.5	SAR 信号处理 .....	406
12.6	侧视 SAR 的多普勒处理 .....	406
12.7	SAR 成像的多普勒处理 .....	409
12.8	距离走动 .....	410
12.9	三维 SAR 成像技术 .....	410
12.10	MATLAB 程序与函数清单 .....	419
<b>第 13 章</b>	<b>信号处理 .....</b>	<b>422</b>
13.1	信号与系统分类 .....	422
13.2	傅里叶变换 .....	423
13.3	傅里叶级数 .....	424
13.4	卷积和相关积分 .....	425
13.5	能量和功率谱密度 .....	426
13.6	随机变量 .....	428
13.7	多元高斯分布 .....	430
13.8	随机过程 .....	431
13.9	采样定理 .....	432
13.10	$z$ 变换 .....	433
13.11	离散傅里叶变换 .....	435
13.12	离散功率谱 .....	435
13.13	加窗技术 .....	437
13.14	MATLAB 程序清单 .....	439
附录 13A	傅里叶变换表 .....	441
附录 13B	常用概率密度 .....	442
附录 13C	$z$ 变换表 .....	443
<b>第 14 章</b>	<b>MATLAB 程序及函数名称表 .....</b>	<b>444</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>447</b>

# 第1章 雷达基础导论

## 1.1 雷达分类

单词 RADAR(雷达)是 RAdio Detection And Ranging 的缩写。一般来说,雷达系统使用调制波形和方向性天线来发射电磁能量到空间的特定区域以搜索目标。在搜索区域内的物体(目标)会反射部分能量(雷达反射信号或回波)回到雷达,然后这些回波被雷达接收机处理,以提取目标的信息,例如距离、速度、角位置和其他目标识别特征。

雷达可以分为地基、机载、天基或舰载雷达系统。雷达也可以根据特定的雷达特征分为多种类别,例如频带、天线类型和使用的波形。另一种分类是根据雷达的任务和/或功能。这包括气象、捕获和搜索、跟踪、边扫描边跟踪、火力控制、预警、超视距、地形跟随和地形回避雷达。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基本辐射器形成的复合天线。阵列天线合成窄的定向波束,其可以是机械扫描或电扫描。电扫描是通过控制馈入阵元的电流的相位实现的,因此采用了相控阵的名称。

雷达最常根据它们使用的波形类型或它们的工作频率分类。首先考虑波形,雷达可以是连续波(CW)雷达或脉冲雷达(PR)(见附录 1A)。CW 雷达连续发射电磁能量,使用单独的发射和接收天线。无调制的 CW 雷达能够准确地测量目标的径向速度(多普勒频移)和角位置。不使用某种形式的调制不能提取目标的距离信息。无调制 CW 雷达的主要用途是目标速度搜索和跟踪,以及导弹制导。脉冲雷达使用脉冲波形串(大部分带有调制)。在这种分类中,雷达系统根据脉冲重复频率(PRF)分为低 PRF、中 PRF 和高 PRF 雷达。低 PRF 雷达主要用于测距,而对目标速度(多普勒频移)不感兴趣。高 PRF 雷达主要用于测量目标速度。连续波雷达和脉冲雷达都能够使用不同的调制策略同时测量目标距离和径向速度。

表 1.1 是根据工作频率的雷达分类。

表 1.1 雷达频段

字符	频率/GHz	新的频段/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 > 34.0	L < 60.0; M > 60.0

高频(HF)雷达使用电离层反射的电磁波检测地平线以下的目标。甚高频(VHF)和超高频(UHF)波段用于甚远距离预警雷达(EWR)。由于非常大的波长和甚远距离测量的灵敏度要求,在这样的雷达系统中需要使用大的孔径。

L 波段雷达主要是地基和舰载系统,用于远程军事和空中交通控制搜索行动。大部分地基和舰载中程雷达工作在 S 波段。大部分气象检测雷达系统是 C 波段雷达。中程搜索和火力控制军用雷达及测量雷达也是 C 波段雷达。

X 波段用于天线大小受到物理限制的雷达系统,这包括大部分军用多模式机载雷达。要求优良的目标检测能力然而不能忍受更高频段大气衰减的雷达系统也可能是 X 波段雷达。更高的频段(Ku、K 和 Ka)遭受严重的气象和大气衰减。因此,使用这些频段的雷达限制在近程应用,例如警用交通雷达、近程地形回避雷达,以及地形跟随雷达。毫米波(MMW)雷达主要限于非常近距离的射频(RF)搜索器和实验雷达系统。

## 1.2 距离

图 1.1 是一个简化的脉冲雷达框图。时序控制产生整个系统所需要的同步时序信号。调制信号由调制器/发射机模块产生并且馈送给天线。天线在发射和接收模式之间的切换由收发开关控制。收发开关允许一个天线既可以用于发射,也可以用于接收。在发射期间,收发开关将雷达电磁能量导向天线。另一方面,在接收时,收发开关将接收的雷达回波导向接收机。接收机放大雷达反射信号并且为信号处理做准备。目标信息的提取由信号处理机模块执行。目标距离  $R$  是通过测量时间延迟  $\Delta t$ ,即脉冲在雷达与目标之间的双程传播时间来计算的。因为电磁波以光速  $c = 3 \times 10^8$  m/s 传播,所以

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

其中, $R$  的单位是米, $\Delta t$  的单位是秒。因子  $1/2$  是考虑到双程时间延迟的需要。

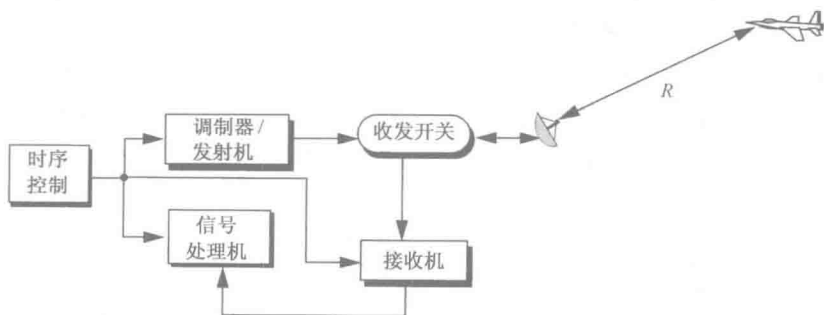


图 1.1 简化的脉冲雷达框图

一般来说,脉冲雷达发射和接收脉冲串,如图 1.2 所示。脉冲间周期(IPP)是  $T$ ,脉冲宽度是  $\tau$ 。IPP 通常称为脉冲重复间隔(PRI)。PRI 的倒数是 PRF,用  $f_r$  表示,即

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

在每个 PRI 期间,雷达只发射  $\tau$  秒能量,然后在 PRI 的剩余时间倾听目标反射信号。雷达发射占空因数(因子) $d_t$  定义为比值  $d_t = \tau/T$ 。雷达平均发射功率为

$$P_{av} = P_1 \times d_t \quad (1.3)$$

其中, $P_1$  表示雷达峰值发射功率。脉冲能量为  $E_p = P_1\tau = P_{av}T = P_{av}/f_r$ 。

对应于双程时间延迟  $T$  的距离称为雷达不模糊距离  $R_u$ 。考虑图 1.3 所示的例子。回波 1 表示位于距离  $R_1 = c\Delta t/2$  处的目标由于脉冲 1 产生的雷达反射信号。回波 2 可以解释为相同

的目标由于脉冲2产生的反射信号,或者可能是位于距离 $R_2$ 处的更远目标由于脉冲1又产生的反射信号。在这种情况下,

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

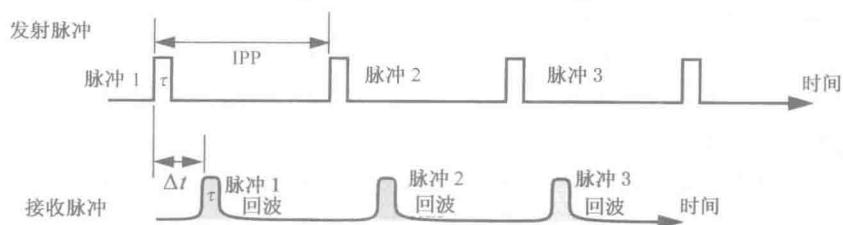


图 1.2 发射和接收脉冲串

显然,距离模糊与回波2有关。因此,一旦发射了一个脉冲,雷达必须等待足够长的时间,以使最大距离处目标的反射信号在下一个脉冲发射前返回。因此,最大不模糊距离必须对应于半个PRI,即

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

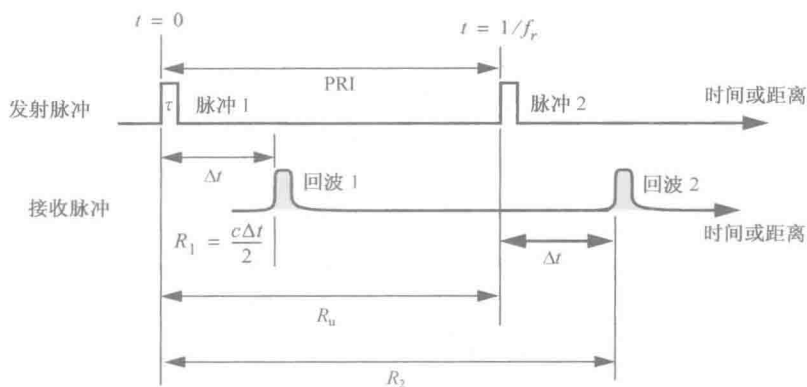


图 1.3 距离模糊示意图

### 1.3 距离分辨率

距离分辨率,表示为 $\Delta R$ ,是描述雷达将相互非常接近的目标检测为不同目标能力的指标。雷达系统通常设计在最小距离 $R_{\min}$ 和最大距离 $R_{\max}$ 之间工作。 $R_{\min}$ 和 $R_{\max}$ 之间的距离划分为 $M$ 个距离单元(门),每个宽度为 $\Delta R$ ,

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

分离至少 $\Delta R$ 的目标能够完全在距离上分辨。在相同距离单元内的目标可以使用信号处理技术在横向距离(方位)上进行分辨。考虑位于距离 $R_1$ 和 $R_2$ 处的两个目标,分别对应时间延迟 $t_1$ 和 $t_2$ 。将这两个距离的差表示为如下 $\Delta R$ :

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

现在,尝试回答下面的问题:使 $R_1$ 处的目标1和 $R_2$ 处的目标2在距离上表现为完全分辨(不同距离单元)的最小 $\delta t$ 是多少?换句话说,最小的 $\Delta R$ 是多少?

首先,假设两个目标分离  $c\tau/4$ ,其中  $\tau$  是脉冲宽度。在这种情况下,当脉冲后沿碰到目标 2 时,前沿已经向后传播了距离  $c\tau$ ,反射的脉冲将包含两个目标的反射信号(即不可分辨的反射信号),如图 1.4(a)所示。然而,如果两个目标至少分开  $c\tau/2$ ,那么当脉冲后沿碰到第一个目标时,目标 2 回波的前沿开始返回到目标 1,产生了两个不同的反射脉冲,如图 1.4(b)所示。因此, $\Delta R$  应该大于或等于  $c\tau/2$ 。因为雷达带宽  $B$  等于  $1/\tau$ ,所以

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} \quad (1.8)$$

一般来说,雷达用户和设计者都寻求使  $\Delta R$  最小,以增强雷达性能。如式(1.8)所表明,为了获得好的距离分辨率,必须使脉冲宽度最小。然而,这样将减小平均发射功率并且增加工作带宽。获得好的距离分辨率的同时维持足够的平均发射功率,可以通过使用脉冲压缩技术来实现。

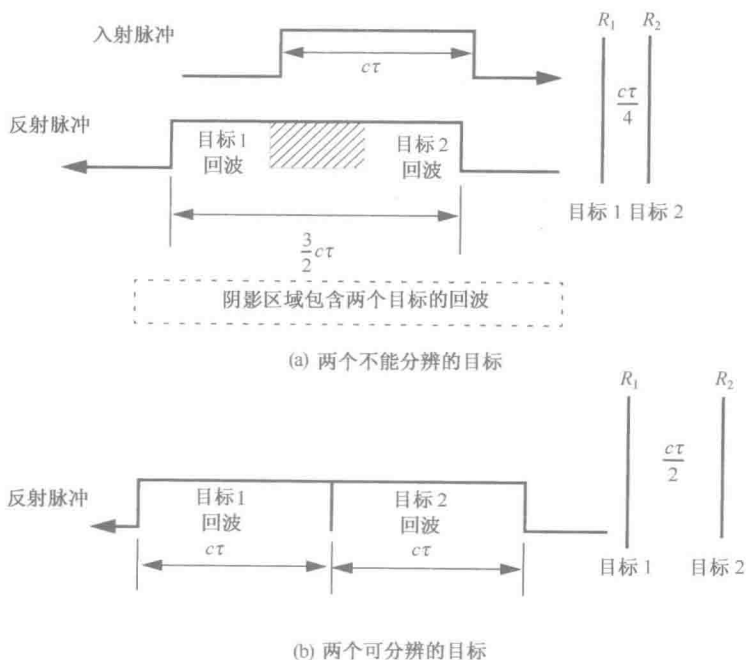


图 1.4

## 1.4 多普勒频率

雷达使用多普勒频率来提取目标的径向速度(距离变化率),以及区分运动和静止目标与物体,例如杂波。多普勒现象描述了由于目标相对于辐射源的运动而引起的入射波形中心频率的偏移。根据目标运动的方向,此频移可能是正的或负的。入射到目标的波形具有以波长  $\lambda$  分隔的等相位波前。接近目标使反射的等相位波前互相更靠近(更小的波长)。相反,离开或后退目标(远离雷达运动)使反射的等相位波前扩展(更大的波长),如图 1.5 所示。

考虑一个宽度为  $\tau$ (秒)的脉冲入射到一个以速度  $v$  向雷达运动的目标上,如图 1.6 所示。定义  $d$  为在间隔  $\Delta t$  内目标在脉冲内运动的距离(米),即

$$d = v\Delta t \quad (1.9)$$

其中, $\Delta t$  等于从脉冲前沿碰到目标到脉冲后沿碰到目标之间的时间。因为脉冲以光速运动,

后沿运动的距离为  $c\tau - d$ , 所以

$$c\tau = c\Delta t + v\Delta t \tag{1.10}$$

并且

$$c\tau' = c\Delta t - v\Delta t \tag{1.11}$$

式(1.11)除以式(1.10), 得到

$$\frac{c\tau'}{c\tau} = \frac{c\Delta t - v\Delta t}{c\Delta t + v\Delta t} \tag{1.12}$$

从式(1.12)的左边和右边分别消除  $c$  和  $\Delta t$  后, 可以建立入射和反射脉冲宽度之间的如下关系式:

$$\tau' = \frac{c-v}{c+v}\tau \tag{1.13}$$

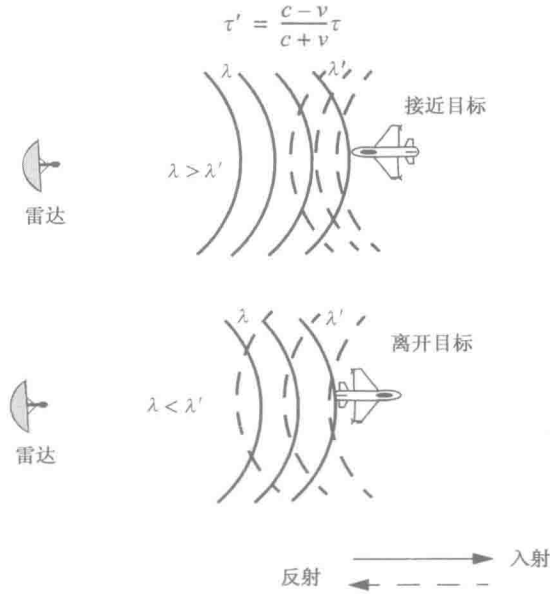


图 1.5 目标运动对反射的等相位波前的影响

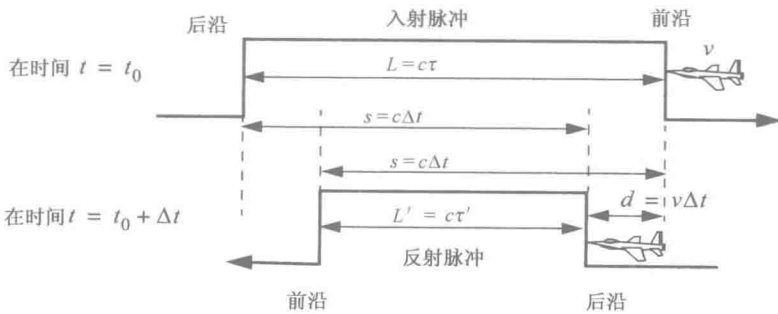


图 1.6 目标速度对单个脉冲影响的示意图

实际上, 因子  $(c-v)/(c+v)$  通常称为时间膨胀因子。注意到如果  $v=0$ , 那么  $\tau' = \tau$ 。以类似的方式, 对于离开目标也可以计算  $\tau'$ 。此时, 有

$$\tau' = \frac{v+c}{c-v}\tau \tag{1.14}$$

为了推导多普勒频率的表达式, 考虑图 1.7 所示的图例。脉冲 2 的前沿花费  $\Delta t$  秒的时间走过  $(c/f_r) - d$  的距离撞到目标。在相同的时间间隔内, 脉冲 1 的前沿走过相同的距离  $c\Delta t$ 。



更准确的表示如下:

$$d = v\Delta t \quad (1.15)$$

$$\frac{c}{f_r} - d = c\Delta t \quad (1.16)$$

求解  $\Delta t$  得到

$$\Delta t = \frac{c/f_r}{c+v} \quad (1.17)$$

$$d = \frac{cv/f_r}{c+v} \quad (1.18)$$

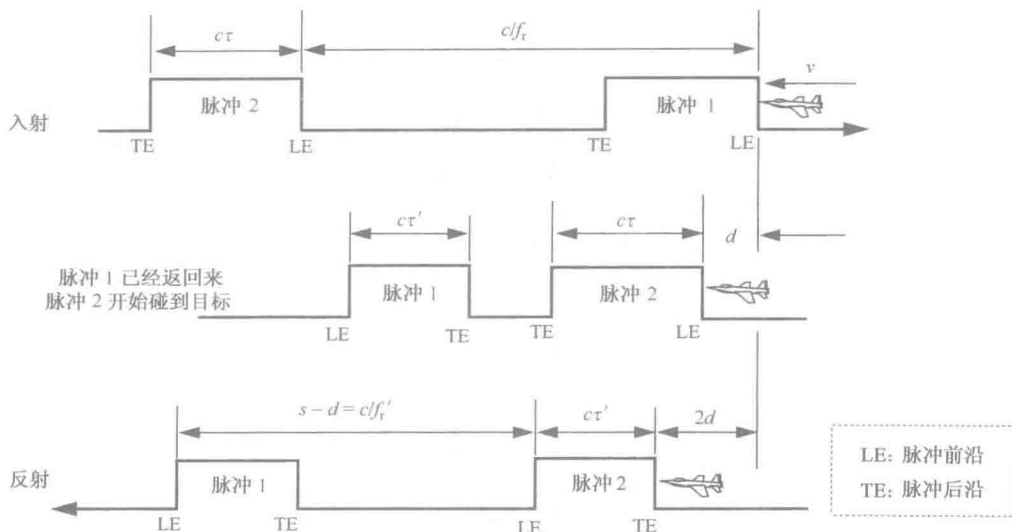


图 1.7 目标运动对雷达脉冲影响的图例

现在反射脉冲的间距是  $s-d$ , 新的 PRF 是  $f_r'$ , 并且

$$s-d = \frac{c}{f_r'} = c\Delta t - \frac{cv/f_r}{c+v} \quad (1.19)$$

因此, 新 PRF 和原 PRF 的关系为

$$f_r' = \frac{c+v}{c-v} f_r \quad (1.20)$$

然而, 因为周期数不变, 反射信号的频率会升高相同的因子。将新频率表示为  $f_0'$ , 其等于

$$f_0' = \frac{c+v}{c-v} f_0 \quad (1.21)$$

其中,  $f_0$  是入射信号的载频。多普勒频率  $f_d$  定义为差频  $f_0' - f_0$ 。更准确的表示如下:

$$f_d = f_0' - f_0 = \frac{c+v}{c-v} f_0 - f_0 = \frac{2v}{c-v} f_0 \quad (1.22)$$

但是, 因为  $v \ll c$  和  $c = \lambda f_0$ , 所以

$$f_d \approx \frac{2v}{c} f_0 = \frac{2v}{\lambda} \quad (1.23)$$

式(1.23)表明多普勒频移与目标速度成比例, 因此可以从距离变化率提取  $f_d$ , 反之亦然。

式(1.23)的结果也可以使用下面的方法推导。图 1.8 显示了一个以速度  $v$  接近的目标。设  $R_0$  表示在时间  $t_0$  (时间参考) 时的距离, 那么在任意时间  $t$  到目标的距离为

$$R(t) = R_0 - v(t - t_0) \quad (1.24)$$