

国防电子信息技术丛书

Mc
Graw
Hill

Introduction to Radar Systems, Third Edition

雷达系统导论

(第三版)

[美] Merrill I. Skolnik 著

左群声 徐国良 马林 王德纯 等译

王德纯 方能航 审校



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

雷达系统导论

(第三版)

Introduction to Radar Systems, Third Edition

[美] Merrill I. Skolnik 著

左群声 徐国良 马林 王德纯 等译

王德纯 方能航 等校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

《雷达系统导论》(第三版)共分11章,主要内容包括雷达基本原理和方程,现代雷达技术体制,动目标指示和多普勒雷达技术,跟踪雷达技术,噪声中信号检测技术,雷达信号的信息提取技术,雷达杂波特性和雷达波传播特点等,并详细介绍了雷达天线、雷达发射机和雷达接收机等分系统技术。

本书系统覆盖了现代雷达的理论与技术,内容系统、完整。每章后都附有大量习题及参考文献,便于读者进一步学习和研究。

本书可作为高等院校电子工程专业的高年级本科生和研究生参考教材,也可作为相关专业工程技术人员参考用书。

Merrill I. Skolnik

Introduction to Radar Systems 3E

ISBN: 0-07-118189-X

Copyright © 2001 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Original Language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No Part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. And Publishing House of Electronics Industry © 2006

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和美国麦格劳-希尔(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 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:01-2003-7878

图书在版编目(CIP)数据

雷达系统导论:第三版/(美)斯科尼克(Skolnik, M. I.)著;左群声等译.—北京:电子工业出版社,2010.4
(国防电子信息技术丛书)

书名原文:Introduction to Radar Systems, Third Edition

ISBN 9787-121-10669-9

I. 雷… II. ①斯… ②左… III. 雷达—高等学校—教材 IV. TN95

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第061008号

责任编辑:杨丽娟 特约编辑:明足群

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:37 字数:948千字

印 次:2010年4月第1次印刷

印 数:3000册 定价:76.00元

凡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。

质量投诉请发邮件至 zls@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

翻译委员会

主任：左群声

副主任：徐国良 马林 王德纯 赵玉洁 李宗强

委员(以姓氏笔划为序)：

才永杰 马以亮 马静 牛宝君 王仁德 王东 王玫 王荫槐
邓大松 刘显庭 刘湘梅 朱兆麒 何孝芸 张飏 李国成 汪洋
沙舟 陆健 陈绪元 周琪 柯长海 相正平 唐晓东 曹向东
梁海珊 谢洁 雷旺敏

审校委员会

主任：王德纯

副主任：方能航

委员(以姓氏笔划为序)：

丁家会 于文震 马晓艳 王宏哲 史国庆 孙茂友 杜耀惟 邢文革
何炳发 陈国海 周文瑜 郑新 金林 胡明春 唐晓东 徐春林
郭崇贤 黄增兴 殷连生 程钧 蒋微波 董树人 董士嘉

编辑委员会

主任：陈玲

副主任：张坚 童勤勋

委员：陆萍 蔡晓睿 李明 朱峥嵘 刘芳

译 者 序

雷达是集中了现代电子科学技术先进成果的高科技系统。雷达是利用电磁波探测目标的电子装备。雷达发射的电磁波照射目标并接收其回波,由此来发现目标并测定位置、运动方向和速度及其他特性。经过近 70 年的发展,雷达已广泛应用于地面、车载、舰载、机载等平台方面,这些雷达已经和正在执行着国防军事和经济建设任务。近年来,雷达应用已向外空发展,出现了天基雷达,用于遥感成像、目标监视、预警等。现代雷达系统除了功能扩展外,其自身抗电子干扰能力和生存能力等也越来越受到人们关注。

Skolnik 博士编著的《雷达系统导论》是一本全面系统阐述雷达系统基础理论和工程技术的经典著作,第一版是在 1966 年出版的,当时受到了世界各国从事雷达系统与技术研究的工程技术人员和高校师生的广泛欢迎。60 年代以后,随着雷达技术的发展和现代电子技术的应用,出现了许多雷达新技术、新体制,作者于 1980 年对原书做了大量修改,出版了本书第二版。进入 21 世纪,作者对第二版再次进行了修改,于 2001 年出版了本书第三版。每一次再版,都体现了作者紧跟雷达系统技术发展的潮流,及时将雷达新技术反映在本书中。本书每章后都附有作业和习题及大量参考文献,便于读者进一步思考、学习和研究。这里需要补充说明的是:在本书中文版中,对于原文的人名、地名,以及函数、参数等的命名,已被其他中译著作广泛采用的译名,译文中均用其相应的中译名,其他则采用原文形式;书中所有公式的录排均参照原书。

本书由中国电子科技集团公司第十四研究所和中国人民解放军空军驻沪宁地区军事代表室组织翻译。本书在翻译出版过程中,得到了中国电子科技集团公司第十四研究所所长罗群研究员、电子工业出版社文宏武社长、电子工业出版社王志刚书记的大力支持,以及第十四研究所各部门领导与专家的大量帮助和支持,在此一并表示感谢。

对于翻译中的错误与不当之处,敬请指出,不胜感激!以便今后改正。

译 者

前 言

自 1980 年本书第二版出版以来,雷达技术及其应用持续发展。自那时起出现了许多新的雷达系统:

- 增强型气象雷达(Nexrad 终端多普勒气象雷达、风廓线雷达、TRMM 卫星气象雷达和机载风切变检测雷达)
- 行星探索雷达(用于探索金星的麦哲伦雷达;用于探索提坦,即土星的一个行星的卡西尼雷达)
- 干涉型合成孔径雷达,用于场景的三维成像和对慢速运动表面目标的检测
- 逆合成孔径雷达,ISAR(用于舰船识别的 APS-137)
- 地面穿透雷达
- 相控阵雷达的批量生产(“爱国者”、“宙斯盾”、“铺路爪”和 B-1B 轰炸机雷达)
- 有源孔径相控阵雷达
- 弹道导弹防御雷达(地基雷达 GBR 和“箭”式导弹防御系统)
- 高频超视距雷达(ROTHR 和 Jindalee)
- 战场监视(JSTARS)雷达
- 用于环境遥感的雷达
- 改进的空中交通管制雷达
- 具有复杂多普勒处理的新型多功能军用战斗机/攻击机机载雷达

此外,在利用数字技术进行信号处理、数据处理和雷达控制方面已经取得广泛进展;利用多普勒现象对严重杂波环境中运动目标的检测取得显著改善;对来自地面和海面的雷达回波特性有了更好的理解;检测决策和信息提取实现了自动化;目标识别;固态发射机及功率电子管的进展;无人值守高可靠雷达系统的研制。而且,由于隐形(低横截面积目标)、低空/高空高速攻击机的发展,以及电子战技术能力的提高,都推动着军用雷达进行重大改进。

《雷达系统导论》第三版和先前两版一样,是以介绍雷达和雷达系统各方面基本原理的一学年研究生教材为基础的。本书可用于自学,也适合于从事雷达及有关系统的研制、采购、制造和应用各领域的工程师和管理人员参考。

对大多数工学院的课程目录的查阅表明,与系统有关的课程很少,而正是有了系统,才有电子工程的存在。工程的核心就是设计一个系统以实现某些有用的功能。雷达是电子工程系统的一个典型的例子,它利用了被电子工程师们实际应用的许多专业技术,包括信号处理、数据处理、波形设计、电磁散射、检测、参数估计、信息提取、天线、传播、发射机和接收机等。由于这些专题对雷达系统会产生影响,因此,是本文中对雷达讨论的一部分内容。有些只是一带而过,对另一些则作比较详细的讨论。

本书还包括一些关于雷达的专门内容:对雷达基本了解所必需的并可作为系统设计工具的距离方程;在动目标显示(MTI)雷达和脉冲多普勒雷达中一样,都是利用多普勒频移将运动目标回波从接收到的静止(杂波)环境回波中区分开来;用单脉冲和圆锥扫描雷达跟踪目标;用

监视雷达跟踪目标;雷达信号的检测;使信-噪比最大的匹配滤波器;雷达测量精度,以及影响雷达性能的自然环境回波的特性。

第三版和第二版一样,进行了大量修订。几乎每一段都有改变或整段替换。章节的顺序也重新安排,以反映作者在他自己讲授的研究生课程中是如何讲授这些材料的。第一学期(第1~4章)通过非常重要且广泛应用的雷达距离方程的推导,利用多普勒频移从非常严重的陆地杂波和海杂波回波中提取微弱的运动目标回波,以及利用雷达进行运动目标跟踪等介绍许多基本的雷达概念。第8章关于雷达波传播的大部分材料通常包括在第一学期中,并且作为第2章雷达方程的一部分来讨论。第二学期(第5~7章和第9章)涵盖噪声中信号检测、雷达信号中信息提取、波形,当限制雷达性能的主要因素是杂波而不是噪声时的目标检测和雷达天线的许多形式。当时间允许时,讨论雷达发射机和接收机,以及回顾一些重要的雷达应用(不是本书的一部分)。有时,发射机或接收机课题在第一学期中通过让学生提供关于这些雷达分系统某一方面的小论文来介绍。

第二版中许多课题由于有许多新的资料和其重要性的提高,在第三版中得到了扩充。由于出版商要求本书保持一个合理的字数,因此,不得不去除一些课题以允许其他内容的扩充。去除的是一些已变得过时的课题,例如,相控阵天线中移相的一些方法和用于调频脉冲压缩的各种色散延迟线。第二版第3章关于连续波雷达和调频雷达由于利用这两种雷达越来越少而被略去了。低功率连续波雷达和调频连续波雷达还将用于一些特殊应用,因而,简要地包括在本书第3章末尾,但远程高功率连续波雷达由于其收、发需要单独分开的天线,基本上已被采用单个天线的脉冲多普勒雷达所取代。另外被删除的是第二版的最后一章,该章由关于各种系统课题的简短概述组成,如合成孔径雷达、高频超视距雷达、对空监视雷达、测高仪和三坐标雷达、ECCM、双基地雷达和毫米波雷达。虽然这些仍然是重要的雷达课题,但如果本书要涵盖其他雷达课题方面的进展的话,它们就不能是本版内容的一部分。还有值得讨论的其他雷达系统应用,但要恰当地将雷达的所有重要内容涵盖在一本书中是困难的。

在第一版中关于雷达天线为单独一章。在第二版中天线被涵盖在两章中:一章是关于反射面天线的,另一章是关于相控阵的。在第三版中,天线又被编在一章中,是本书最长的一章。将天线归为一章而不是两章,使处理反射面天线和阵列天线二者共同的课题更容易。天线这一章很长,还因为天线在雷达系统中的作用独特而重大。

本书中包含了通常两学期研究生课程所不能涵盖的更多课题。其中的许多课题是给做实际工作的工程师或管理人员使用本教材作参考资料用的。因此,教师们应根据特定课程的目的选择哪些课题应该省略。

人们认识到“米-千克-秒”单位制通常用于大学课程和世界上大多数国家,但在本版中仍然沿用混合单位。因为在工程上,特别是在美国,混合单位看来目前仍在(例如,国际空中交通管制系统仍然用海里表示距离,用英尺表示高度)。而且,在本书中当某一量的值是从发表的文章中引用来的时候,就采用该文章中采用的单位而没有把它变换成其他单位。有一天,所有单位可能将是“米-千克-秒”单位制,但到那时之前工程师仍应熟悉混合制单位,因为实践中仍然采用这些单位。

分贝或 dB 贯穿使用在整个雷达工程中,并且广泛用于本教材。有些学生似乎对其使用太熟练。这里提醒一下,dB 定义为功率比或与功率单位有关的参数(如天线增益)的对数的 10 倍,即 $10\log(\text{功率比或与功率单位有关的参数})$ 。当考虑 dB 时,如果始终取两个功率之比,

则决不会因为乘以常数 10 还是 20 而引起混淆；它将始终是 10。利用方程时还还必须注意，有些参数虽然以 dB 给出，但在方程中该参数是一个数字。dB 必须转换成数字而不是将 dB 值直接代入方程。

本版在每章的结尾提供了习题和问题，以方便读者（及教师）将本书作为雷达课程的研究教材。这些习题和问题也应是在职工程师自学的辅助工具。作为一门面向系统的课程，要提供往往在工程学校中所教的解决问题的课程中所出现的那类问题是困难的。在有些习题和问题中，求出答案的方法或方程可在本教程中找到，而且它们有助于强化所涵盖的内容。不过，其他习题试图扩大在本教材中的材料，因此，读者必须扩展自己的思路来寻找答案。从出版商 McGraw-Hill 处应能获得这些习题和问题的解答手册。

在自己的雷达课中，我发现学期综合论文是一个重要的学习工具。我通常尝试着提出一项相对直截了当的，学生不可能在发表的文献中找到的“概念设计”任务（在过去的若干年中由于雷达的进展变得越来越难做）。学期论文总是在第二学期中指定。有时我在第一学期就已指定了一篇比第二学期中用得比较简单的课题论文，以往我已采用或考虑的学期论文题目也列入了解答手册中。

如同其他两版那样，我努力提供足够的参考文献来说明我的资料来源，并指明在读者有兴趣进一步深入时在什么地方可获得某一特定课题的更多资料。《雷达手册》，也由 McGraw-Hill 出版，是获得本书中许多课题方面更多先进资料的一个很好来源。《雷达手册》的每一章都由一名或多名精通本章所涉及的特定领域方面的专家撰写。

在第一版（1960 年）的《雷达系统导论》中，几乎所有的参考文献都是“最近的”，因为当时雷达还年轻。有关雷达的早期出版物在 20 世纪 40 年代后期开始出现于文献中，大约在本书第一版出版之前 15 或 16 年。因此，第一版包括了许多“最近的”参考文献。在第三版中，如果有的话，我已努力连同早期的一起提供最近的参考文献。这并不总是可能的，因为有些仍然重要的课题已经成熟，并且近年来没有太大进展。因此，本版中大量参考文献已有 30~40 年的历史。有些包含在第一版或第二版中，但少数较老的参考文献没有包含在前两版中，因为它们所涵盖的课题已经沉睡多年直至技术赶上和/或需要它们时才需要参考它们。

这类性质上涵盖雷达许多方面、许多不同课题的书，内容上多依靠雷达工程师撰写的公开技术文献。我依赖这些文献编写了本书，并且我要感谢从目前存在的浩瀚的雷达文献中所得到的重大帮助。

Merrill I. Skolnik

目 录

第 1 章 雷达简介	1
1.1 基本雷达	1
1.2 雷达方程的简单形式	4
1.3 雷达框图	5
1.4 雷达频率	8
1.5 雷达的应用	9
1.6 雷达的起源.....	10
参考文献	20
习题	21
第 2 章 雷达方程	23
2.1 引言.....	23
2.2 噪声中信号的检测.....	24
2.3 接收机噪声和信-噪比	25
2.4 概率密度函数.....	26
2.5 检测和虚警概率.....	29
2.6 雷达脉冲的积累.....	34
2.7 目标雷达横截面积.....	37
2.8 雷达横截面积的起伏.....	50
2.9 发射机功率.....	56
2.10 脉冲重复频率	57
2.11 天线参数	58
2.12 系统损耗	61
2.13 其他有关雷达方程的考虑	67
参考文献	72
习题	75
第 3 章 MTI 雷达和脉冲多普勒雷达	80
3.1 引言.....	80
3.2 延迟线对消器.....	86
3.3 参差脉冲重复频率.....	95
3.4 多普勒滤波器组	100
3.5 数字 MTI 处理.....	103
3.6 运动目标检测器	107
3.7 MTI 性能的限制	113
3.8 运动平台的 MTI(AMTI)	122

3.9	脉冲多普勒雷达	130
3.10	其他的多普勒雷达	138
	参考文献	148
	习题	156
第 4 章	跟踪雷达	160
4.1	用雷达跟踪	160
4.2	单脉冲跟踪	162
4.3	圆锥扫描和顺序波束转换	169
4.4	跟踪精度的限制	173
4.5	低角跟踪	180
4.6	距离跟踪	185
4.7	其他有关跟踪雷达的专题	186
4.8	跟踪雷达的比较	191
4.9	监视雷达自动跟踪	192
	参考文献	199
	习题	205
第 5 章	噪声中的信号检测	208
5.1	引言	208
5.2	匹配滤波器接收机	208
5.3	检测准则	213
5.4	检波器	215
5.5	自动检测	218
5.6	积累器	218
5.7	恒虚警率(CFAR)接收机	222
5.8	雷达操作员	226
5.9	信号管理	226
	参考文献	229
	习题	232
第 6 章	雷达信号的信息	235
6.1	引言	235
6.2	基本雷达测量	235
6.3	雷达测量的理论精度	238
6.4	模糊图	247
6.5	脉冲压缩	253
6.6	目标识别	275
	参考文献	291
	习题	299
第 7 章	雷达杂波	303
7.1	雷达杂波介绍	303

7.2	表面杂波雷达方程	304
7.3	地杂波	308
7.4	海杂波	318
7.5	表面杂波的统计模型	327
7.6	气象杂波	332
7.7	大气回波的其他来源	337
7.8	杂波中目标的检测	342
	参考文献.....	352
	习题.....	361
第 8 章	雷达波的传播	364
8.1	引言	364
8.2	平坦地面的前向散射	364
8.3	球形地球表面的散射	369
8.4	大气折射——标准传播	372
8.5	非标准传播	379
8.6	绕射	390
8.7	大气衰减	393
8.8	环境噪声或外部噪声	394
8.9	其他的传播影响	397
	参考文献.....	399
	习题.....	404
第 9 章	雷达天线	407
9.1	雷达天线的功能	407
9.2	天线参数	408
9.3	天线辐射方向图和孔径照射	412
9.4	反射面天线	418
9.5	电子扫描相控阵天线	423
9.6	移相器	429
9.7	频率扫描阵列	439
9.8	相控阵的辐射器	445
9.9	用于相控阵的结构	450
9.10	机械扫描平面阵列天线.....	465
9.11	方向图综合.....	469
9.12	误差对方向图的影响.....	475
9.13	低副瓣天线.....	482
9.14	相控阵雷达的成本.....	488
9.15	关于相控阵天线的其他论题.....	491
9.16	相控阵雷达系统结论.....	496
9.17	关于天线的其他论题.....	498

参考文献	507
习题	518
第 10 章 雷达发射机	522
10.1 引言	522
10.2 线性束功率管	524
10.3 固态射频功率源	530
10.4 磁控管	535
10.5 正交场放大器	538
10.6 其他射频功率源	540
10.7 雷达发射机的其他方面	543
参考文献	545
习题	547
第 11 章 雷达接收机	549
11.1 引言	549
11.2 接收机噪声系数	550
11.3 超外差接收机	552
11.4 收发开关和接收机保护器	562
11.5 雷达显示器	567
参考文献	571
习题	574

第1章 雷达简介

1.1 基本雷达

雷达是用于检测和定位反射物体,如飞机、舰船、航天飞机、车辆、行人和自然环境的一种电磁系统。它通过将能量辐射到空间并且探测由物体或目标反射的回波信号来工作。返回到雷达的反射能量不仅表明目标的存在,而且,通过比较接收到的回波信号与发射信号,就可确定其位置和获得其他与目标有关的信息。雷达可以在远或近距离,以及在光学和红外传感器不能穿透的条件下完成任务。它可以在黑暗、薄雾、浓雾、下雨和雪时工作。其高精度测距和全天候工作的能力是其最重要属性之一。

雷达的基本原理示于图 1.1。发射机产生电磁信号(如正弦波短脉冲),由天线辐射到空中。发射的信号一部分被目标拦截并向许多方向再辐射。向后再辐射回到雷达的信号被雷达天线采集,并送到接收机。在接收机中,该信号被处理以检测目标的存在并且确定其位置。当雷达波形为重复脉冲序列时,通常采用一部天线以时间分割为基础进行发射和接收。通过测量雷达信号到目标并从目标返回雷达的时间,得到目标的距离(雷达工程师用术语“range”表示“distance”,它并不是一些字典中的对 range 的定义^①)。目标的角度位置可以根据收到的回波信号幅度为最大时,窄波束宽度雷达天线所指的方向而获得。如果目标是运动的,由于多普勒效应回波信号的频率会漂移。该频率漂移与目标相对于雷达的速度(也称径向速度)成正比。多普勒频移被广泛用于雷达中,作为将所要的运动目标从自然环境,如陆地、海面或雨反射回来的固定(不想要的)“杂波”回波中分离开来的基础。雷达也可提供有关正在被观察目标的特征信息。

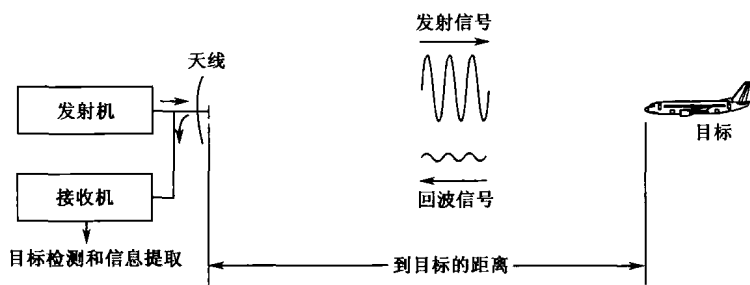


图 1.1 雷达基本原理

术语“雷达”是英语“无线电检测和测距”的缩略语的音译。该名称反映了雷达领域的早期

^① 韦伯斯特的“新学院字典”中将“range”定义为“一个弹丸可以被推进到的水平距离”或“武器到目标间的水平距离”。这不是雷达中所用术语的含义。另一方面,这本字典中将“测距仪”定义为“确定到目标的距离的一种仪器”,这与雷达中的意思相同。

工作者对需要一种能够检测到目标的存在并且测量其距离的装置所赋予的重要性。虽然现代雷达能够从目标回波信号提取比其距离更多的信息,但距离测量仍然是其最重要功能之一。没有和雷达一样在晴朗和恶劣天气条件下都可精确测量远距离的、能和它竞争的技术。

到目标的距离

最普通的雷达信号或波形是调制一个正弦载频后,得到的有点像矩形的窄宽度脉冲序列(有时叫脉冲串)。到目标的距离根据雷达信号到目标并返回的时间 T_R 确定。电磁能量在自由空间以光速传播,即 $c=3\times 10^8$ m/s。因此,雷达信号传播到距离为 R 的目标并返回雷达的时间为 $2R/c$ 。于是,到目标的距离为

$$R = \frac{cT_R}{2} \quad (1.1)$$

如果距离以公里或海里表示,时间 T 以 μs 表示,式(1.1)就变成

$$R(\text{km}) = 0.15T_R(\mu\text{s}) \quad \text{或} \quad R(\text{nmi}) = 0.081 T_R(\mu\text{s})$$

每 $1\mu\text{s}$ 往返时间相当于距离 150m, 164 码, 492 英尺, 0.081 海里或 0.093 英里。雷达信号传播 1 海里并返回的时间为 $12.35\mu\text{s}$ 。

最大非模糊距离

一旦雷达将一个信号发射到空间,在下一个脉冲发射前,必须要有足够的时间使所有回波信号返回到雷达。因此,脉冲发射速率由预期的最远目标距离决定。如果脉冲间的时间 T_p 太短,由远距离目标来的第一个脉冲回波信号可能在下一个脉冲发射后才到达,从而错误地与下一个脉冲关联,而不是与早先发射的脉冲相关联。这就会导致不正确的或模糊的距离测量。在下一个脉冲发射后到达的回波叫做“二次反射回波(或多次反射回波,如果来自更早的脉冲)”。这样的回波显得比实际的距离要近。如果不知道它是一个二次反射回波的话,就会使测出的距离是错误的。在其之内目标不会以二次反射回波形式出现的最大距离叫最大非模糊距离, R_{un} 为

$$R_{\text{un}} = \frac{cT_p}{2} = \frac{c}{2f_p} \quad (1.2)$$

式中, $T_p =$ 脉冲重复周期 $= 1/f_p$, $f_p =$ 脉冲重复频率(prf),通常以 Hz 或每秒脉冲数(pps)表示。最大非模糊距离与脉冲重复频率的函数关系如图 1.2 所示。术语“脉冲重复速率”与“脉冲重复频率”有时交替使用。

雷达波形

典型雷达采用脉冲波形,其中一例见图 1.3。本例中的峰值功率 $P_t = 1\text{MW}$, 脉冲宽度 $\tau = 1\mu\text{s}$, 脉冲重复周期 $T_p = 1\text{ms} = 1000\mu\text{s}$ (这些数字只是为了举例说明,并不对应于任何一部特定雷达,但它们与中程对空监视雷达所预期的参数相类似)。脉冲重复频率 f_p 为 1000Hz,它提供 150km 或 81nmi 的最大非模糊作用距离。重复脉冲串波形的平均功率(P_{av})等于 $P_t\tau/T_p = P_t\tau f_p$ 。因此,这种情况下的平均功率为 $10^6 \times 10^{-6} / 10^{-3} = 1\text{kW}$ 。雷达波形的占空因子定义为雷达辐射的总时间与雷达可以辐射的总时间之比,即 $\tau/T_p = \tau f_p$,或等效为 P_{av}/P_t 。在这种情况下,占空因子为 0.001。脉冲能量等于 $P_t\tau$,即 1 焦耳。如果雷达可检测 10^{-12}W 的信号,则回波要比所发射的信号电平低 180dB。短宽度脉冲波形是有吸引力的,因为在接收微弱回波信号时,强发射机信号并不辐射。

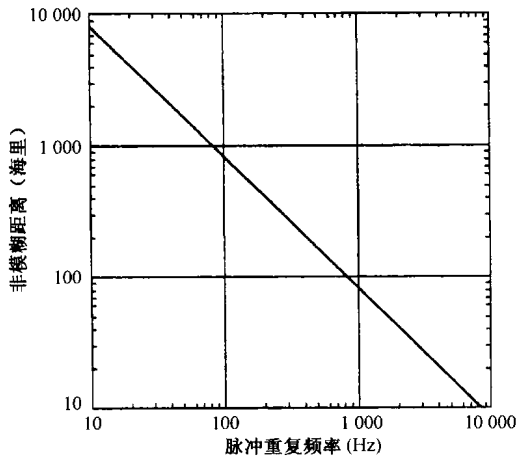


图 1.2 式(1.2)的图示。最大非模糊距离 R_{un} 为脉冲重复频率 f_p 的函数

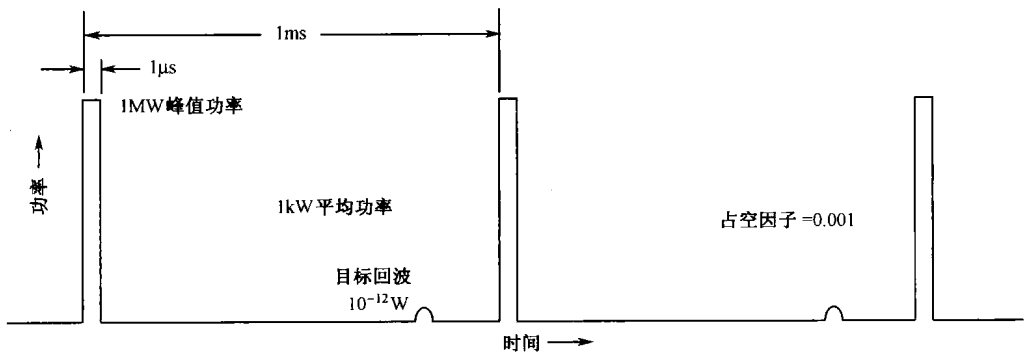


图 1.3 脉冲波形举例,具有中程对空监视雷达所用的“典型”值。矩形脉冲表示脉冲调制的正弦波

如脉冲宽度为 $\tau = 1\mu\text{s}$, 则波形在空间伸展在 $c\tau = 300\text{m}$ 的距离上。当两个等同的目标相隔距离为该值的一半, 即 $c\tau/2$ 时, 它们在距离上可被分辨开来。因子 $1/2$ 是由于雷达波往返传播的缘故。例如, 当 $\tau = 1\mu\text{s}$ 时, 如果两个尺寸相等的目标相隔 150m , 则它们可被分辨开来。

对于一些远程雷达来说, 需要很长的脉冲来获得足够的能量以检测远距离上的小目标。不过, 长脉冲在距离上分辨力较差。可以采用调频或调相来增大长脉冲的频谱宽度, 从而获得短脉冲的分辨力, 这就叫做“脉冲压缩”, 将在 6.5 节中叙述。雷达中也采用连续波 (CW) 波形。由于连续波必须在发射时接收, 因此, 连续波雷达利用由目标运动引起的回波信号的多普勒频移, 在频域中将微弱回波信号与强发射信号和来自固定杂波 (陆地、海或气象杂波) 的回波分隔开来, 多普勒频移也用来测出目标的径向速度 (3.1 节)。简单的连续波雷达不测距离。不过, 它可通过对载波进行调频或调相来获得距离。例如测量飞机离地高度的雷达高度计中采用调频连续波 (FM-CW) 波形。

提取多普勒频移的脉冲雷达既可以叫做“动目标显示 (MTI) 雷达”, 也可以叫做“脉冲多普勒雷达”, 这取决于脉冲重复频率和占空因子的特定值。MTI 雷达脉冲重复频率低并且占空因子小, 而脉冲多普勒雷达具有高 prf 和大占空因子。这两种类型的多普勒雷达在第 3 章中讨论。几乎所有设计用来探测飞机的雷达都采用多普勒频移, 抑制不想要的大的静态杂波回波。

1.2 雷达方程的简单形式

雷达方程将雷达作用距离与发射机、接收机、天线和目标的特性及环境关联起来。它不仅用于确定某一特定雷达能够探测到的目标的最大作用距离,且可充当了解影响雷达性能因素的一种手段,还是雷达系统设计中的一个重要辅助工具。在本节中,将推导雷达距离方程的简单形式。

如果发射机功率 P_t 由各向同性天线(一种在所有方向上均匀辐射的天线)辐射,则距雷达 R 处的功率密度等于辐射功率除以半径为 R 的假想球的表面积 $4\pi R^2$,即

$$\text{距各向同性天线 } R \text{ 处的功率密度} = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (1.3)$$

功率密度单位为 W/m^2 。不过,雷达采用定向天线(具有窄波束宽度)将辐射功率 P_t 集中在一个特定的方向上。天线增益是指在某一方向上所辐射的功率密度与各向同性天线在同一方向上呈现的功率密度相比时对增加的功率密度的一种度量。天线的最大增益 G 可定义为

$$G = \frac{\text{定向天线所辐射的最大功率密度}}{\text{具有相同输入功率的各向同性天线所辐射的功率密度}}$$

于是,发射增益为 G 的定向天线在目标处的功率增益为

$$\text{距定向天线 } R \text{ 处的功率密度} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (1.4)$$

目标拦截一部分入射能量,再将它向各方向辐射。向雷达方向再辐射的功率密度(回波信号)正是人们感兴趣的。对于入射到目标的特定功率密度而言,目标的雷达横截面积决定了回到雷达的功率密度,用 σ 表示。为了简便,它通常叫“目标横截面积,雷达横截面积”或简称为“横截面积”。雷达横截面积由下列方程定义

$$\text{回到雷达的再辐射功率密度} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \quad (1.5)$$

雷达横截面积的单位为面积的单位,但将雷达横截面积直接与目标的物理尺寸相联系容易引起误解。正如 2.7 节所讨论的那样,雷达横截面积更多地与目标形状而不与其物理尺寸有关。

雷达天线俘获一部分入射到它的回波能量。雷达接收到的功率为入射功率密度[式(1.5)]与接收天线的有效孔径面积 A_e 的乘积。有效面积与物理尺寸 A 有关,关系式为 $A_e = \rho_a A$,其中, ρ_a = 天线孔径效率。于是,接收到的信号功率 P_r (W)为

$$P_r = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot A_e = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (1.6)$$

雷达最大作用距离 R_{\max} 为超出了就检测不到目标的距离,并且当接收到的信号功率 P_r 正好等于最小可检测信号 S_{\min} 时发生。将 $S_{\min} = P_r$ 代入式(1.6)并重新整理后得到

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1.7)$$

这就是雷达距离方程的基本形式(简称雷达方程或距离方程)。重要的天线参数是发射增益和接收有效面积。还没有将发射机功率规定为平均功率或峰值功率。它取决于如何定义 S_{\min} 。在本文中, P_t 表示峰值功率。

如果同一部天线用于发射和接收,就像通常在雷达中那样,则天线理论给出的发射增益 G 和接收有效面积 A_e 的关系式为^[1,2]

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi Q_e A}{\lambda^2} \quad (1.8)$$

式中, λ = 波长(波长 $\lambda = c/f$, 其中, c = 传播速度, f = 频率)。可将式(1.8)代入式(1.7), 先取代 A_e , 再取代 G , 就得到另外两种形式的雷达方程

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1.9)$$

$$R_{\max} = \left[\frac{P_r A_e^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 S_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1.10)$$

这三种形式的雷达方程[式(1.7), 式(1.9), 式(1.10)]基本上是一样的, 但解读上有些差别。例如, 由式(1.9)可以说, 最大作用距离随 $\lambda^{1/2}$ 变化, 但式(1.10)表明它随 $\lambda^{-1/2}$ 变化, 情况正好相反。另一方面, 式(1.7)没有给出波长与作用距离的明显依存关系。正确的解释与天线增益是否随波长或频率的变化而保持常数有关, 就像式(1.9)所隐含的那样; 或者与有效面积是否保持常数有关, 就像式(1.10)所隐含的那样。对于与频率无关的式(1.7), 必须采用两部天线。发射天线必须具有与波长无关的增益, 接收天线必须具有与波长无关的有效孔径(不过, 很少这样做)。

这些简化的雷达方程不能恰当地描述真实雷达的性能。许多重要的因素没有明显地包括进去。简单形式的雷达距离方程预测的作用距离过高, 有时高两倍以上。在第2章中, 要对简单形式的雷达方程扩展, 以考虑其他因素, 从而使雷达方程与真实雷达所观察到的距离性能具有更好的一致性。

1.3 雷达框图

可以利用图 1.4 的简单框图来帮助描述脉冲雷达的工作。发射机可以是功率放大器, 如速调管、行波管或晶体管放大器。它也可以是功率振荡器, 如磁控管。磁控管振荡器已经广泛用于中等能力的脉冲雷达, 但当需要高的平均功率或需要并不简单的脉冲波形(如脉冲压缩中所用)时, 或者当依据多普勒频移(第3章课题)在强杂波回波中要有良好的运动目标检测性能时, 最好采用放大器。功率放大器示于图 1.4 中。波形产生器产生低功率的雷达信号, 然后送入功率放大器。在固态功率源以外的多数功率放大器中, 调制器(10.7节)和输入脉冲同步将发射机接通和断开。当采用功率振荡器时, 它也是通过脉冲调制器接通和断开来产生脉冲波形。

发射机输出能量用波导或其他形式的传输线送到天线, 再经天线辐射到空中。天线可以是机扫抛物反射面天线、机扫平面阵列或电扫相控阵(第9章)。发射时, 抛物反射面天线将能量集中在一个窄波束中, 就像汽车前灯或探照灯那样。相控阵天线是许多小的辐射单元的集合, 这些小辐射单元的信号在空中合成, 产生一个辐射平面波。利用每个辐射单元的移相器, 电扫相控阵可迅速改变天线波束在空间的方向而无须机械转动天线。在没有关于天线的其他资料可以利用时, “典型的抛物反射面天线”的波束宽度($^\circ$)的近似表达式为 $65\lambda/D$, 其中, D 是和波束宽度同平面内的天线尺寸, λ 是雷达波长。例如, 水平尺寸 $D = 32.5$ 个波长的天线的方位波束宽度为 2° 。在 $3\text{GHz}(\lambda = 10\text{cm})$ 频率上, 天线长度为 3.25m 或 10.7 英尺。监视雷达在