

Mc
Graw
Hill

Education

雷达手册

(第三版)

[美] Merrill I. Skolnik 主编

南京电子技术研究所 译

周万幸	马 林	胡明春	总校
张光义	贲 德	方能航	总审

Radar Handbook
(Third Edition)



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

雷 达 手 册

(第三版)

Radar Handbook

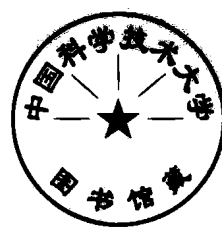
(Third Edition)

[美] Merrill I. Skolnik 主编

南京电子技术研究所 译

周万幸 马 林 胡明春 总校

张光义 贲 德 方能航 总审



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是查阅雷达技术的各种体制、所使用的技术及有关参考文献的权威手册。《雷达手册（第二版）》（1990年）出版已20年。本书补充了1990—2008年新出现的体制和技术（见目录）的相关信息。和第二版一样，本书由当今世界上37位雷达各方面造诣很深的专家、学者合作撰写而成，有很高的学术水平。

本书适合从事雷达研究、生产、使用的技术人员和大专院校师生使用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

Merrill I. Skolnik

Radar Handbook, Third Edition

ISBN:978-0-07-148547-0

Copyright ©2008 by The McGraw-Hill Companies Inc.

All Rights Reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版专有出版权由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授予电子工业出版社。专有出版版权受法律保护。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。

本书封底贴有McGraw-Hill公司的激光防伪标贴，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2008-2047

图书在版编目（CIP）数据

雷达手册：第3版/（美）斯科尼克（Skolnik,M.I.）著；南京电子技术研究所译. —北京：电子工业出版社，2010.7

书名原文：Radar Handbook,3/e

ISBN 978-7-121-11000-9

I. ①雷… II. ①斯… ②南… III. ①雷达—手册 IV. ①TN95-62

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第100224号

责任编辑：刘海艳（lhy@phei.com.cn）

印 刷：涿州市京南印刷厂

装 订：涿州市桃园装订有限公司

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

开 本：787×1 092 1/16 印张：69.75 字数：1785.6千字

印 次：2010年7月第1次印刷

印 数：5 000册 定价：238.00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 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。

《雷达手册（第三版）》中文版出版说明

《雷达手册》（以下简称《手册》）第一版出版于 1970 年，第二版出版于 1990 年，第三版出版于 2008 年。《手册》的第一、二版在我国也相继有中译本出版发行，特别是 2003 年由空军司令部雷达兵部组织的第二版中译本受到了雷达界的广泛欢迎。考虑到第二版与第三版出版相隔已近 20 年，在这期间电子通信技术得到迅速发展变化，大量新技术也应用到雷达系统设计中，雷达领域也出现了许多新进展，所以《手册》的第三版有了大量的修改与补充，主要增加的新技术有：

- （1）改进的信号处理、数据处理及多功能雷达中的数字技术；
- （2）有源相控阵雷达系统；
- （3）高频超视距雷达；
- （4）改进的探测杂波中动目标方法；
- （5）逆合成孔径雷达；
- （6）高精度星载雷达高度计；
- （7）超宽带雷达；
- （8）大功率、宽带速调管；
- （9）大功率、高工作温度宽禁带晶体管；
- （10）低副瓣非线性脉冲压缩等。

在每章后的参考文献都是十分宝贵的文献资源，并且也增加了许多新作者参与编写。可以说本书相当于近年出版的各种文集的精华和权威论述，对我国研制新型雷达的总体和各分机研究人员有重大参考价值，也是使用、维护人员和研究所管理人员必备的参考书。为此南京电子技术研究所各级领导认真组织，经过广大科技人员近两年的辛勤努力，完成了翻译校对工作使本书得以出版发行。由于我们水平有限，书中难免会有错误和不妥之处，敬请读者指正。

南京电子技术研究所

主 编 简 介

Merrill I. Skolnik 曾担任美国海军研究实验室雷达分部主管超过 30 年。在此之前，他在麻省理工大学林肯实验室、国防分析研究所和电子通信公司研究分部期间参与了雷达的发展。他是 McGraw-Hill 广受欢迎的《雷达系统导论》一书的作者，该书已出第三版。他同时也是《雷达应用》一书的主编和 IEEE 学报的前编辑。他在（美国）约翰霍普金斯大学获得工学博士学位，也在那里获得了电子工程的工学学士及硕士学位。他是美国国家工程科学院的院士、IEEE 会士、IEEE Dennis J. Picard 雷达技术与应用奖的首位获奖者。

本书其他作者

- Jame J. Alter** （美国）海军研究实验室（第 25 章）
- Stuart J. Anderson** 澳大利亚科学与技术局（第 20 章）
- W. G. Bath** （美国）约翰霍普金斯大学应用物理实验室（第 7 章）
- Michael T. Borkowski** （美国）雷声（Raytheon）公司（第 11 章）
- Jeffrey O. Coleman** （美国）海军研究实验室（第 25 章）
- Michael E. Cooley** （美国）诺斯罗普·格鲁曼（Northrop Grumman）公司电子系统部（第 12 章）
- David Daniels** ERA 科技（第 21 章）
- Daniel Davis** （美国）诺斯罗普·格鲁曼公司（第 12 章）
- James K. Day** （美国）洛克希德·马丁（Lockheed Martin）公司（第 3 章）
- Michael R. Ducoff** （美国）洛克希德·马丁公司（第 8 章）
- Alfonso Farina** （意大利）SELEX 系统集成公司（第 24 章）
- William G. Fedarko** （美国）诺斯罗普·格鲁曼公司（第 4 章）
- Joe Frank** （美国）约翰霍普金斯大学应用物理实验室（第 13 章）
- Vilhelm Gregers-Hansen** （美国）海军研究实验室（第 2 章）
- James M. Headrick** （美国）海军研究实验室（第 20 章）
- Dean D. Howard** （美国）国际电报电话工业公司顾问（第 9 章）
- R. Jeffery Keeler** （美国）国家大气研究中心（第 19 章）
- Eugene F. Knott** Tomorrow's 研究（第 14 章）
- Carlo Kopp** （澳大利亚）莫纳什大学（第 5 章）
- David Lynch, Jr.** DL 科学公司（第 5 章）
- Richard K. Moore** （美国）堪萨斯州大学（第 16 章）
- Andy Norris** 导航系统方面的顾问（第 22 章）
- Wayne L. Patterson** （美国）空间和海上作战系统中心（第 26 章）
- Keith Raney** （美国）约翰霍普金斯大学应用物理实验室（第 18 章）
- John D. Richards** （美国）约翰霍普金斯大学应用物理实验室（第 13 章）
- Robert J. Serafin** （美国）国家大气研究中心（第 19 章）
- William W. Shrader** Shrader 联盟（第 2 章）
- Merrill Skolnik** （第 1 章和第 10 章）
- Fred M. Staudaher** （美国）海军研究实验室，已退休（第 3 章）
- John P. Stralka** （美国）诺斯罗普·格鲁曼公司（第 4 章）

Roger Sullivan （美国）防御分析研究所（第 17 章）

Byron W. Tietjen （美国）洛克希德·马丁公司（第 8 章）

G. V. Trunk （美国）约翰霍普金斯大学应用物理实验室（第 7 章）

Thomas A. Weil （第 10 章）

Lewis B. Wetzel （美国）海军研究实验室，已退休（第 15 章）

Nicholas J. Willis 技术服务公司，已退休（第 23 章）

Michael E. Yeomans （美国）雷声（Raytheon）公司（第 6 章）

原著序

雷达是电子工程系统的一个重要例子。在大学工科课程中，人们通常把重点放在诸如电路设计、信号、固态器件、数字处理、电子设备、电磁场、自动控制和微波等电子工程的基本工具上。然而，在电子工程实践的现实世界中，这些只是构成一些为有用目的而开发的不同类型系统的技术、分机或子系统。除了雷达和其他的传感器系统，电子系统包括通信、控制、能源、信息、工业、军事、导航、娱乐、医药和其他一些系统。这些是电子工程实践的对象。如果没有它们，就不会需要电子工程师了。然而实践的工程师在涉及制造一个新型的电子工程系统时，常常需要依靠获取他（她）所学工科课程之外的知识。例如雷达工程师，需要理解构成一部雷达的主要元器件及分系统，同时要理解它们是如何协同工作的。《雷达手册》试图对这个任务有所帮助。除了雷达系统设计者之外，希望那些负责采购新型雷达系统、使用和维护雷达以及管理进行以上工作的工程师的人，同样能发现《雷达手册》对完成此类任务有所帮助。

《雷达手册》的第三版是雷达在民用及军用领域的发展和运用在用途和技术改进方面不断发展的一个明证。以下是自第二版问世以来，在雷达领域出现的众多新进展中的一部分：

- 数字技术大量用于改进的信号处理、数据处理、判决、灵活的雷达管理以及多功能雷达中。

- 多普勒气象雷达。

- 地面动目标显示 GMTI。

- 由 MIT 林肯实验室获得的丰富的试验用于描述低视角地杂波的数据库，取代了第二次世界大战以来广泛使用的杂波模型。

- 认识到低掠射角微波海面回波主要由所谓的“海面峰”所致。

- 采用固态组件的有源孔径相控阵雷达系统，又称为有源电扫描阵列（AESA），它对需要管理功率及空间覆盖范围的某些多功能雷达应用具有吸引力。

- 用雷达探索行星。

- 基于计算机预测在真实环境中电磁波传播性能的方法。

- 高频超视距雷达的实际应用。

- 改进的探测杂波中动目标方法，包括空时自适应处理。

- 逆合成孔径雷达目标识别的实际应用。

- 干涉合成孔径雷达（InSAR），用来获得已分辨出的散射体的高度，或在 SAR 场景图像中检测地面动目标。

- 高精度星载高度计，以厘米级的精度测量大地水平面。

- 探地超宽带雷达及类似应用。

- 改进的大功率、宽带速调管功率源，基于集束谐振腔以及多注速调管。
- 宽禁带半导体的出现，因为其大功率和高工作温度，使更高的性能成为可能。
- 基于回旋管的大功率毫米波产生器的出现。
- 低副瓣的非线性调频脉冲压缩。
- 计算机代替操作者成为信息提取和决策者。

以上未按任何特定次序排列，也不应认为是自本书第二版出版以来雷达领域中出现的所有进展的列举。有一些第一、二版《雷达手册》中的主题现在关注者少，因此没有包括在这一版中。

各章的作者都是各自领域的专家，他们被告知可假定他们那章的读者具备一般的雷达知识，读者甚至可以是雷达领域中另一专业的专家，但不一定很了解该章作者所写的主题。

可以设想因《雷达手册》已出版很长时间了，前面两版本的各章作者不是全部都可能参加第三版的写作。许多上两版的作者已经退休或离开我们了。第三版二十六章中有十六章的作者或共同作者没有参加前两版的写作。

所有章节艰难的写作工作由各章专家作者们独立完成。因此《雷达手册》的价值是奉献了其时间、知识和经验的作者们的勤奋和专长的结果，使这个手册成为雷达系统工程师和那些雷达系统的开发、生产和使用者们桌面上有用的工具书。我十分感激所有作者，对他们的出色工作和为各自任务花费的大量时间。正是各章作者使手册获得成功。我对他们表达真诚的感谢。

如前两版中陈述的一样，我希望读者在引证和参考本书的资料时，能提到有关各章作者的姓名，而不是只提及《雷达手册》的主编。

Merrill I. Skolnik
美国马里兰州巴尔的摩市

目 录

第 1 章 雷达概论	1
1.1 雷达简介	1
雷达基本组成	2
雷达发射机	3
雷达天线	3
1.2 雷达类型	4
1.3 从雷达回波可获取的信息	6
距离	6
径向速度	6
角方向	7
尺寸及形状	7
雷达中带宽的重要性	7
信噪比	8
在多个频率上工作	8
雷达中的多普勒频移	8
1.4 雷达方程	9
1.5 雷达频率的字母频带名称	11
1.6 工作频率对雷达的影响	12
高频 (HF, 3~30 MHz)	12
甚高频 (VHF, 30~300 MHz)	12
超高频 (UHF, 300 MHz~1 GHz)	13
L 波段 (1.0~2.0 GHz)	13
S 波段 (2.0~4.0 GHz)	13
C 波段 (4.0~8.0 GHz)	14
X 波段 (8.0~12.0 GHz)	14
Ku、K 和 Ka 波段 (12.0~40.0 GHz)	14
毫米波波段	14
激光雷达	15
1.7 雷达命名规范	15
1.8 雷达过去的一些进展	16
1.9 雷达应用	17
军事应用	17
环境遥感	17
空中交通管制	18
其他应用	18

1.10 雷达系统方案设计	18
一般指导方针	19
雷达方程在方案设计中的作用	19
参考文献	20
第2章 动目标显示 (MTI) 雷达	21
2.1 序言	21
2.2 MTI 雷达介绍	22
MTI 方框图	23
动目标检测器 (MTD) 方框图	25
2.3 对动目标的杂波滤波器响应	28
2.4 杂波特性	29
频谱特性	29
幅度特性	34
2.5 定义	36
改善因子 (I)	36
杂波衰减	37
信杂比 (SCR) 改善 (I_{SCR})	37
杂波中可见度 (SCV)	38
杂波间可见度 (ICV)	38
滤波器失配损耗	39
杂波可见度因子 (V_{oc})	39
2.6 改善因子的计算	39
2.7 杂波滤波器的最优设计	43
2.8 MTI 系统杂波滤波器设计	47
参差的设计方法	53
反馈和脉冲间参差	56
参差对改善因子所产生的限制	56
时变加权	57
速度响应曲线第一凹点的深度	58
2.9 气象雷达 MTI 滤波器设计	59
2.10 杂波滤波器组设计	63
滤波器的经验设计	64
切比雪夫滤波器组	64
快速傅里叶变换滤波器组	67
使用约束的最佳化技术的滤波器组设计	67
2.11 接收机限幅引起的性能降低	69
2.12 雷达系统稳定性要求	75
系统不稳定性	75
量化噪声对改善因子的影响	81
与脉冲压缩有关的考虑	82

2.13	动态范围和 A/D 转换方面的考虑	85
2.14	自适应 MTI	87
2.15	雷达杂波图	89
2.16	速度灵敏度控制 (SVC)	93
	SVC 的概念	93
	距离和距变率模糊分辨力	94
2.17	适用于 MTI 雷达系统的几点考虑	96
	硬件考虑	96
	环境上的考虑	99
	参考文献	103
第 3 章	机载动目标显示 (AMTI) 雷达	106
3.1	采用机载 MTI 技术的系统	106
3.2	覆盖范围的考虑	107
3.3	AMTI 性能驱动因素	107
3.4	平台运动和高度对 MTI 性能的影响	108
	斜距对多普勒偏移的影响	109
	时间平均杂波相干机载雷达 (TACCAR)	110
	平台运动的影响	112
3.5	平台运动的补偿 (垂直天线孔径方向上的)	113
	电子偏置相位中心天线	113
	天线副瓣内的功率	114
3.6	扫描运动的补偿	116
	补偿方向图的选择	118
3.7	平台运动与扫描运动同时补偿	119
3.8	平台前向运动补偿	122
3.9	时空自适应运动补偿	123
	引言	123
	最佳自适应加权 (McGuffin)	124
	空时自适应处理结构的分类 (Ward)	125
	多普勒前单元天线空时自适应处理	125
	多普勒前波束-空间的空时自适应处理	127
	多普勒后单元天线空时自适应处理	128
	多普勒后波束空间空时自适应处理	128
	实现上的考虑	129
	性能比较	129
3.10	多重谱的影响	130
3.11	AMTI 雷达系统示例	131
	参考文献	132
第 4 章	脉冲多普勒 (PD) 雷达	133
4.1	特性和应用	133

术语	133
应用	134
脉冲重复频率	134
脉冲多普勒频谱	135
模糊和脉冲重复频率 (PRF) 的选择	137
距离波门	139
时间基线的定义	140
基本组成	141
4.2 PD 杂波	144
概述	144
固定雷达的地物杂波	145
运动雷达的地物杂波	145
杂波回波: 通用方程	146
主瓣杂波	146
主瓣杂波的滤波	147
杂波瞬态抑制	147
高度线杂波的消隐	148
副瓣杂波	148
离散副瓣杂波	148
4.3 动态范围及稳定度要求	152
动态范围	152
稳定度要求	155
4.4 距离及多普勒解模糊	158
多重离散 PRF 测距	158
解多普勒模糊	160
高 PRF 测距	160
4.5 模式及波形设计	162
目标搜索	162
目标跟踪	164
多目标跟踪 (MTT)	165
4.6 测距性能	165
雷达距离方程	165
系统损耗	166
虚警概率	170
探测概率	171
缩略语表	173
参考文献	175
第 5 章 战斗机多功能雷达系统	179
5.1 引言	179
多功能雷达结构	180

多功能战斗机雷达软件结构	183
距离多普勒情况	184
有源电扫阵列 (AESA)	185
5.2 典型任务和模式	187
空 - 面任务剖面	187
空 - 面模式序列	187
各模式的波形变化	188
空 - 空任务剖面	189
空 - 空模式序列	190
定时结构	191
5.3 空 - 空模式的描述和波形	192
空 - 空搜索、截获和跟踪——中重频	192
中重频——典型距离 - 多普勒盲区图	193
中重频选择的算法	193
距离选通高重频	195
RGHPRF 选择的算法	197
非合作空中目标识别	197
气象规避	198
空中数据链	199
雷达孔径数据连接	200
信标会合和队形保持	201
大功率 - 孔径干扰	201
5.4 空地模式说明及波形	202
地形跟随和地形规避	202
地形高度评估	203
地形数据库融合	203
海面搜索、截获和跟踪	204
逆合成孔径雷达 (ISAR)	204
空对地测距	206
精确速度更新	206
监听或被动收听	206
多普勒波束锐化 (DBS)	206
合成孔径雷达	208
DBS 或 SAR PRF, 脉冲长度和压缩选择	209
地面动目标显示 (GMTI) 和跟踪 (GMTT)	210
对地面动目标设门限	211
典型 GMT 武器投放	212
导弹性能评估、跟踪和更新	213
AGC、校准和自测	213
参考文献	214

第 6 章 雷达接收机	219
6.1 雷达接收机的组成	219
6.2 噪声和动态范围的考虑	221
定义	222
计算	224
6.3 带宽考虑	225
定义	225
重要特性	225
去斜处理	226
6.4 接收机前端	227
组成	227
特性对雷达性能的影响	227
辐射频谱的寄生失真	227
混频器的寄生响应	228
混频器寄生效应图	228
镜像抑制混频器	229
放大器和混频器的特性	230
6.5 本振	230
本振的功能	230
稳定本振的不稳定性	230
相参振荡器和定时的不稳定性	235
雷达的整机不稳定性	235
低噪声频率源	235
频率合成技术	236
频率切换后的相位相参	236
去斜处理	237
6.6 增益控制	237
灵敏度时间控制 (STC)	237
杂波图自动增益控制	237
可编程增益控制	237
增益归一化	237
自动噪声电平控制	238
增益控制部件	238
6.7 滤波	239
雷达整机系统的滤波	239
匹配滤波	239
接收机滤波	239
滤波器特性	240
距离副瓣	242
通道匹配要求	243
6.8 限幅器	243

应用	243
特性	243
6.9 I/Q 解调器	244
应用	244
实现	245
增益或相位的失衡	245
时间延迟和频率响应失衡	246
I 、 Q 通道的非线性	247
直流偏置	247
6.10 A/D 转换器	247
应用	248
数据格式	248
Delta-Sigma 转换器	248
性能特性	248
输入噪声电平和动态范围	250
A/D 转换器采样时钟稳定性	251
6.11 数字接收机	252
数字下变频	253
希尔伯特变换器	254
I/Q 误差	255
用多速率处理和多相滤波器实现数字下变频	255
多通道接收机考虑	256
6.12 双频工作	257
优点	257
实现方法	257
6.13 波形产生与上变频	258
直接数字频率合成器	258
倍频器	259
波形上变频	260
参考文献	260
第 7 章 自动检测、自动跟踪和多传感器融合	262
7.1 引言	262
7.2 自动检测	262
最佳检测器	262
实用检测器	263
虚警控制	270
目标分辨力	277
自动检测小结	279
7.3 自动跟踪	279
航迹文件	281

雷达检测接受	281
用关联的检测更新现有航迹	282
Kalman 滤波的调整	286
跟踪坐标系的选择	288
对付目标运动改变的自适应滤波	289
已接受的检测和现有航迹的关联	290
新航迹形成	294
雷达调度及控制	297
7.4 雷达组网	298
7.5 不相似传感器的融合	300
IFF 融合	301
雷达 - DF (定向) 方位选通脉冲融合	301
参考文献	304
第 8 章 脉冲压缩雷达	309
8.1 引言	309
8.2 脉冲压缩波形类型	310
线性调频 (LFM)	310
非线性调频波形 (NLFM)	318
相位编码波形	322
时间 - 频率编码波形	329
8.3 影响选择脉冲压缩系统的因素	331
8.4 脉冲压缩的实现与雷达系统实例	331
数字波形产生	332
数字脉冲压缩	332
脉冲压缩雷达实例	333
展宽脉冲的压缩	334
展宽脉冲压缩雷达实例	337
附录	339
信号分析总结	339
雷达发射波形	340
匹配滤波器	341
滤波器匹配损失	341
模糊函数	342
匹配滤波器时间响应	342
时间延迟和多普勒频率中目标分辨的条件	343
参考文献	343
第 9 章 跟踪雷达	347
9.1 引言	347
9.2 单脉冲 (同时形成多个天线波束)	349
比幅单脉冲	349