

电扫雷达系统 设计手册

现代雷达编辑部

扫雷达应用。电扫雷达主要误差源的估算表达式，方便地概括在表格中，供系统性能分析人员使用。第十章，介绍了参数管理，这是作者约在15年前探讨出来的一种方法，用以在电扫雷达系统中，通过巧妙地控制所有的雷达参数，以最小的功率—口径和设计复杂性，获得最好的性能。第十一章，包括了为设计和确定一个系统所需的主要电扫雷达参数，以及运行细节、时间、功率、误差和损耗的预算。第十二章，介绍了系统设计方法学，以供读者了解和使用。第十三章，涉及电扫雷达系统总联、试验和鉴定，重点放在为成功地实现它们所需要的具体步骤和控制。第十四章，包括一个事例研究，一步步地进行整个电扫雷达系统的设计，说明前面各章讨论的材料运用。事例研究以对一假设的威胁模型提出性能要求开始，到详细列出从为满足要求所进行的设计中得出的电扫雷达系统参数表为止。

最后，作者、他的许多同行和读者都认为，在关于电扫雷达系统设计这一课题的文献中，非常缺乏内容。本书就是为部分地填补这个空白所做的真诚努力。

P. J. 卡里莱斯

1975年4月

内 容 简 介

本书系根据〔美〕P. J. 卡里莱斯《Electronic Scanning Radar Systems Design Handbook》一书译出。主要从雷达系统设计角度论述了电扫雷达的特点和设计时应考虑的各方面特殊问题。除扼要介绍了搜索和跟踪问题以外，还较详细地说明了阵坐标系统；参数选择；参数管理；系统设计方法；系统总联、测试、鉴定和研制中的管理工作等在其它资料中较少详细谈到的专门问题。本书结合实际列出了设计必需的公式，并列举了大量的例子，可供从事雷达工程的科技人员和大专院校师生参考。

译 者 序

本书作者〔美〕P.J.卡里莱斯是从50年代初期就从事电扫雷达工作的电扫雷达系统设计师，参加过早期频扫雷达的研制，也主持过硬点相控阵雷达（HAPDAR）的研制工作，对系统设计有丰富经验。电扫雷达通过用电子计算机控制来迅速而灵活地改变天线波束指向，数据率高，对目标环境适应性强，有同时对多目标处理的能力，并可执行多种任务（搜索、多目标截获、跟踪、导弹制导、杀伤鉴定等）。由于以上特点，国外主要将电扫雷达用于弹道导弹预警和拦截；防空网中的对空监视和武器控制；陆军野战中的炮火定位；军舰上对陆、海、空监视与武器控制；飞机上的武器控制与空对地探测等重要军事用途。在这些领域中，电扫雷达比机械扫描雷达更经济有效，有代替后者的趋势，在民用中也有广阔前途。

电扫雷达的设计和机械扫描雷达相比有共性也有特殊问题。本书的优点是作者能从雷达系统设计师的角度来全面讲述系统设计中应考虑的各个重要侧面，对每个侧面由一般的技术阐述开始再深入论述设计的具体问题，按工程上所需的深度进行设计举例，并汇总了一些工程上可参考的数据。特别是第七到十四章尤为全书的精华。作为一本手册性的工具

书是值得阅读和借鉴的。

译文由黄为倬、孙宪章、王立鸿、李治铭、徐文卿、杨汉民、黄松浦等分担，校对主要是由黄为倬、黄松浦完成的。

原书有的地方表述得不够确切，刊误也较多，凡发现的都已更正，但在书中并未一一标注出。由于译者水平所限，不妥之处，望读者指正。

前 言

本书主要是为电扫雷达系统设计师写的。书中也提供了电扫雷达系统领域的概貌。电扫雷达系统的设计，打破了雷达技术的界限，并且若运用得当，能最大限度地利用雷达距离方程和雷达性能分析。

尽管本书主要是奉献给电扫雷达系统设计者或设计师的，但对雷达分系统和专业组人员均有参考价值。阵列设计者希望将阵列设计与各个系统联系起来，作出采用单波束还是多波束、相扫或频扫、光馈还是强制馈电、移相器（二极管或铁氧体）或实时器件的决定。发射机设计人员关心是否应该研制高功率单管发射机、多个中等规模的发射机、或者固态收/发组件等等。电扫雷达系统设计手册，为这些专业人员提供了这样的前景：他们可以更好地运用自己的才能于当今和未来的设计。

电扫雷达系统设计师通过系统的步骤，将性能分析人员，波形专家，阵列、波控装置、发射机、接收机、信号处理机、计算机和外围设备、雷达接口装置、控制台和显示器、可靠性、维修能力以及质量控制等方面的专家所作出的贡献集中起来，得出最终的“平衡”系统设计，以最少的风险、复杂性、费用和研制时间，满足所有的性能要求。所用的方法并不是唯一的，其结果也不是无可争辩地最佳的。

据我所知，这是直接探讨整个电扫雷达系统设计仅有的的一本书。有许多关于雷达分析、元件、技术和系统方面的好书，但是没有一本探讨导致设计出一部电扫雷达系统、工作在特定的环境、并满足用户提出的技术要求的系统设计方法学方面的书。本书根据作者的文章和讲稿写成。最终促使出版这本书是在一九七四年春，当时作者在印度坎普尔工学院的电扫雷达系统设计教程中，担任了为时两周的讲课。几位参加者——印度的学术、军事和工业团体的代表，鼓励作者写关于相控阵系统应用方面的书。

本书以合乎逻辑的次序排编，为系统设计师提供为得出综合的（或平衡的）电扫雷达系统设计所需的工具。尽管每章中对电扫雷达系统所独有的特点作了一些讨论，但大部分概念也适用于常规雷达系统的设计。第一章，推导了雷达距离方程，重点介绍了一些基本的假设，并对方程加以改写，便于电扫雷达系统设计用。给出了电扫雷达距离方程损耗的类型和典型值。最后举例说明之。第二章，指出了电扫雷达特别适合现代雷达要求的理由，并提供了在常规雷达和电扫雷达之间作出选择的依据。第三章，介绍了电扫雷达技术、限制和应用。第四到第六章，论及检测、匹配滤波器、波形和动目标显示理论，重点放在电扫雷达应用上面。第七章，讨论了正弦空间座标在电扫雷达系统设计中的许多用途，最后并给出具体例子。第八章，讨论了电扫雷达系统特有的一些跟踪考虑，诸如：在时间分割的基础上对多目标具有低抽样率的三个座标中的抽样数据伺服回路，以及内插零值跟踪。并给出了Ⅱ型和Ⅲ型滤波器的递归公式。第九章，包括了精度和分辨力设计准则，在角座标中用毫正弦代替毫弧，以供电

目 录

第一章 雷达的基本概念	1
1.1 雷达的主要功能	1
1.2 脉冲雷达系统介绍	1
1.3 距离方程推导	4
噪声	8
检测	10
假设	11
1.4 距离方程损耗	12
系统噪声温度	13
1.5 电扫雷达距离方程的能量形式	14
能量方程的单位	17
1.6 距离方程的使用	18
1.7 小结	22
第二章 现代雷达发展趋势	27
2.1 发展历史	27
2.2 现代雷达要求	29
增加复盖距离	29
提高分辨力	31
缩短反应时间	32

第三章 电扫雷达系统的特点	34
3.1 定义	34
3.2 电扫技术	34
相位	35
实时	37
频率	40
电子馈电开关转换	40
3.3 实现方法	44
一维	44
二维	47
波束分裂技术	53
1. 强制馈电——相位单脉冲	54
2. 强制馈电——幅度单脉冲	54
3. 空间馈电——幅度单脉冲	59
4. 混合接头移相矩阵——幅度单脉冲	59
5. 混合接头移相矩阵——相位单脉冲	60
照射加权	63
3.4 电扫雷达系统的优点	64
3.5 电扫雷达系统的缺点	66
3.6 电扫雷达系统实例	67
附录 A	88
相扫阵列的建立时间	88
附录 B	89
频扫阵列的建立时间	89
第四章 检测理论	95
4.1 统计判决过程	95

4.2 似然比	96
4.3 目标模型和应用	99
目标模型	100
固定幅度	100
斯怀林 I —— 瑞利	102
斯怀林 II —— 瑞利	104
斯怀林 III —— 一个主散射体 + 瑞利	106
斯怀林 IV —— 一个主散射体 + 瑞利	106
对数正态	106
威布尔	107
应用	109
固定幅度	109
斯怀林 I, II —— 瑞利	110
斯怀林 III, IV —— 一个主散射体 + 瑞利	110
斯怀林 I, III —— 固定(脉冲至脉冲)	110
斯怀林 II, IV —— 非相干起伏(脉冲至脉冲)	110
威布尔和对数正态	111
4.4 目标模型比较	111
单次照射	111
多次照射积累	118
累积发现概率	127
第五章 匹配滤波器理论和波形	137
5.1 匹配滤波器理论	137
5.2 滤波器失配损失	142
5.3 用于电扫雷达的波形种类	144

第六章 动目标显示考虑	151
6.1 定义	151
6.2 动目标显示设计公式	152
天线运动限制	157
不稳定性限制	158
杂波面积	159
杂波体积	160
6.3 动目标显示在电扫雷达系统中的应用	162
6.4 动目标显示设计实例	165
第七章 正弦空间座标 (阵列座标)	172
7.1 定义	172
7.2 阵列空间座标概要	173
7.3 单元间距和栅瓣位置	178
7.4 单元间相移差	184
7.5 波束宽度	186
7.6 倾角	188
角度复盖均衡	188
最大阵列增益	192
波束宽度管理	192
最大复盖	192
7.7 阵列设计	193
单元面积	193
单元数目	194
7.8 搜索图形	196
7.9 正弦空间座标在电扫雷达设计中的应用	197
实例	197

附录 C	205
阵列空间座标变换	205
第八章 电扫雷达跟踪考虑	213
8.1 电扫雷达跟踪特性	213
8.2 电扫雷达跟踪回路滤波器	215
Ⅱ型—速度预测	216
Ⅲ型—加速度预测	217
卡尔曼	218
8.3 Ⅱ型和Ⅲ型数字滤波器设计方程	219
设计公式	220
递归跟踪方程	221
8.4 跟踪回路设计方程的应用	222
实例	222
第九章 精度和分辨力	229
9.1 定义	230
精度	230
精密度	230
分辨力	230
9.2 电扫雷达误差源	231
角度	231
距离	236
速度	240
幅度	244
相位	244
9.3 分辨力	245

角度	245
距离	246
多卜勒速度	246
第十章 参数管理	254
10.1 定义	254
10.2 波束宽度	254
10.3 时间	257
搜索	257
跟踪	257
10.4 能量	258
搜索	258
跟踪	259
动目标显示	259
波束扫描	260
10.5 波形	260
10.6 功率	262
10.7 时间和功率预算	262
10.8 工作比	262
10.9 频率	263
第十一章 电扫雷达系统参数	265
11.1 运行细节	265
11.2 时间和功率预算	268
11.3 功能方框图	272
11.4 误差和损耗预算	279

11.5	参数表	279
第十二章	系统设计方法学	285
12.1	方法学	285
12.2	将威胁模型/性能要求变换成雷达参数	289
12.3	实时顺序细节	289
12.4	性能分析	289
	搜索方式	291
	跟踪方式	291
	制导方式	292
	动目标显示—所有方式	292
	参数管理—所有方式	293
12.5	电扫雷达系统设计选择	293
	复盖空域	293
	天线阵	295
	波束产生	296
	功率源	296
	电扫技术	296
	功率馈电网络	297
	波束分裂技术	297
	参数管理	298
	照射加权	298
12.6	计算图表和表格	299
12.7	反复折衷选择	299
第十三章	电扫雷达系统总联、试验和鉴定	301
13.1	工程计划/进度表	302

13.2	大事记	304
13.3	硬件/软件联试计划	307
13.4	软件“构件”计划	309
13.5	性能验证和鉴定	310

第十四章 事例研究—空防电扫雷达系统的

	设计	312
14.1	威胁模型/性能要求	312
	实时工作细节	313
14.2	搜索	314
	探测距离—飞机	314
	探测距离—导弹	314
	分辨力	314
	虚警概率	314
	搜索波束形状	315
	发现概率	322
	飞机—斯怀林 I	322
	导弹—斯怀林 II	325
	能量要求	327
14.3	跟踪	331
	波形	331
	精度—角度	332
	角度误差 (表14—2)	337
	精度—距离	338
	距离误差 (表14—3)	341
14.4	动目标显示	341
14.5	参数管理	346

1.时间	346
1)搜索	346
2)跟踪	346
2.能量	347
1)搜索	347
2)跟踪	348
3)动目标显示	348
4)波束扫描	348
3.波形	350
1)搜索	350
2)跟踪	350
3)动目标显示	351
4.功率	351
1)搜索	351
2)跟踪	351
5.时间和功率预算	351
6.工作比	352
1)搜索	352
2)跟踪	352
3)短期工作比	352
参数管理图表 (表14—1)	355
14.6 空防电扫雷达系统功能方框图	353
14.7 空防电扫雷达系统参数	356

第一章 雷达的基本概念

1.1 雷达的主要功能

雷达（无线电探测和测距）是用于对目标探测、定位（和识别）的电子设备。

雷达的主要功能是：

1. “观察”（探测）出现在地面杂波、雨、阴霾、雾、雪、云、烟和黑暗等环境中的目标。雷达也可设计得穿过这些人眼不能看穿的环境进行观测（或探测）。雷达不能代替人的眼睛，因为眼睛比雷达能更好地分辨目标的细节和辨别彩色。但是，人眼不能穿过这些不利的环境进行观察，也不能进行测量。而雷达扩大了人观察周围环境的视觉器官的能力。

2. 测量目标的距离（这是最重要的雷达功能）和角度。多卜勒速度 f_D 是可以测量的第四个基本参数。从这些座标 (R, A_z, E) 及其时间导数 $(\dot{R}$ 或 f_D, \dot{A}_z, \dot{E} 和 \ddot{R} 或 $\dot{f}_D, \ddot{A}_z, \ddot{E})$ ，可对目标定位并计算出它们的轨道。

3. 与其它的雷达测量手段结合起来，测量与目标尺寸和形状有关的目标回波幅度，提供对目标的识别。

1.2 脉冲雷达系统介绍

脉冲雷达系统的简化方框图示于图 1.1。