

电扫描雷达系统 设计手册

国防工业出版社

译 序

随着航空和空间技术的迅速发展，对现代雷达的威力覆盖、分辨能力、抗干扰性和反应时间等指标提出了更高的要求。早期的机械扫描雷达，由于其固有的缺点，已愈来愈难以适应。近期的电扫描雷达具有较全面满足上述要求的能力，引起了国内外广泛的重视。

目前，有关电扫描雷达的文献资料不少，但专题论述其设计方法的书却很少见。〔美〕一九七六年出版的《Electronic Scanning Radar Systems (ESRS) Design Handbook》一书，系统地叙述了电扫描雷达系统的设计方法，讨论了设计师们所关心的一些问题，以手册形式给出了有关的基本理论、设计公式和图表，并用示例说明其具体的设计步序，对从事雷达工程的科研设计人员及大专院校有关专业的师生会有所裨益。为了高速发展我国电子工业，迅速实现雷达技术现代化，本着“洋为中用”的精神，我们翻译了这本书。

参加本书翻译的同志有冯文炳（前言和第一、二章）、顾昌贤（第三章）、陆克强（第四章）、陈春林（第五、六章）、李恩福（第七章）、宋叔淳（第八章）、张秀太（第九章）、索鸿笙（第十、十一章）、范庆忠（第十二、十三章）和李府安（第十四章），最后由常茂森同志审校。

本书系手册性质，对有些问题讨论并不深入。原书是由一讲稿整理而成，有些地方文字叙述显得不够确切，不大连贯，并有一些错误。凡已发现的错误与不妥之处，都作了更正和说明。由于水平所限，译校不妥之处在所难免，请读者批评指正。

前 言

关于雷达的著作，已有许多系统工程的书藉和文献问世，最近还出版了大量关于相控阵天线和电扫描雷达的技术资料。可是，至今尚缺少一本电扫描雷达系统的实用设计指南，编写这本书就填补了这方面的空白。

三十年代的原始雷达也采用过阵列天线，但其相位分布是固定的，波束是机械扫描的。在第二次世界大战期间，在微波雷达上，曾研制过一种电气-机械扫描器，其单个辐射单元的相移是变化的，可使波束以每秒数百度的速率连续地扫描。在五十年代初期，频率扫描技术得到了发展，并用于实际的搜索雷达上。五十年代后期，发展了二维相控阵天线设计，使电子扫描覆盖广阔的空域有了可能，如采用三个或四个单独的天线，则可保证覆盖半球形空域。

可是，相控阵雷达系统并没有继阵列天线设计成功之后很快出现，主要是由于天线单元及有关馈源和控制系统的昂贵费用，限制了早期用它来担负最关键的任务，例如：用于预防弹道导弹和高级舰艇防空。采用多用途雷达来同时（或用快速时间分割方式）满足多目标搜索、跟踪和截击，以及满足协调雷达系统的程序和控制系统的各种要求，已被证明是一项非常艰难的任务。

本书所介绍的主题——电扫描雷达系统工程，就是为了完成这个任务。由于在各功能之间分配雷达性能要求时需要平衡，以及在选择雷达主要参数时，各功能之间需要折衷，因而电扫描雷达系统设计师的工作特别必要。

本书所述的技术和方法，简明扼要，直截了当，并能妥善折衷使雷达满足要求，对得到给定课题的最佳设计，将有很大帮助。

D. K. 巴顿

原 序

本书主要是供电扫描雷达系统 (ESRS) 设计师参考的, 也对电扫描雷达这门新技术的概况作了介绍。电扫描雷达系统设计, 需要打破常规雷达技术界线, 充分利用雷达作用距离方程, 并详尽地进行雷达性能分析。

虽然这本书主要是给电扫描雷达系统设计师看的, 但对雷达分系统和各专业组的人员均有参考价值。相控阵设计师, 必定会对系统中采用怎样的相控阵设计感兴趣: 用单波束还是多波束, 用相扫还是频扫, 用光学馈电还是组合馈电, 用移相器 (二极管或铁氧体) 还是实时器件等等。而发射机设计师当然会关心: 究竟研制单管大功率发射机, 多个中等发射管, 还是采用固态发射/接收微型组件等等。有关专业人员阅读电扫描雷达系统设计的书, 可以开阔眼界, 了解前景, 从而在目前和将来的设计工作中, 更好地发挥他们的才能。

电扫描雷达系统设计师, 根据性能分析、波形设计、相控阵列、波束控制单元、发射机、接收机、信号处理器、计算机及外围设备、雷达接口单元、控制台/显示器、可靠性、维护和质量控制等技术专家的意见, 用系统方法作出最后的“平衡”的系统设计, 以最可靠的方案、最简单的结构、最省的费用和最短的研制周期, 来达到全部性能要求。可是, 这种方法并非唯一的, 其结果也不能说是最佳的。

据我所知, 专题论述完整的电扫描雷达系统设计的书, 目前还只有这一本。虽然, 已有许多论述雷达分析、部件、技术和系统的好论文, 但却没有一篇阐明电扫描雷达系统的设计方法, 以完善电扫描雷达系统, 使其适应特定环境条件工作和满足众多用

户提出的更高要求。本书是由作者过去发表的论文和讲稿整理而成，是在一九七四年春季，当作者在“康普”（Kanpur）印度技术学院讲授了两周电扫描雷达系统设计进修课程之后，整理出版的。

本书的编印，为系统设计师提供作出综合/平衡电扫描雷达系统设计所需要的逻辑方法。虽然书中每章都讨论了电扫描雷达系统的设计特征，然而，很多概念也同样适用于研制常规雷达的系统设计。第一章雷达距离方程是根据一些基本假定导出的，为设计电扫描雷达系统时使用方便起见，作了一些修正。本章给出了电扫描雷达距离方程中损耗的类型和典型值，章末还附有说明的示例。第二章阐明电扫描雷达系统为何特别适合于现代雷达的要求，并为究竟选择常规雷达还是电扫描雷达提供了必要依据。第三章叙述电扫描雷达技术、它的局限性及其应用。第四章到第六章着重讨论检测、匹配滤波器、波形和动目标显示（MTI）理论及其在电扫描雷达上的应用。第七章讨论正弦空间坐标在电扫描雷达设计中的应用，并举例加以说明。电扫描雷达系统独特的跟踪考虑，例如：按时间分割制对多目标以低取样率工作的三坐标取样数据伺服环路和内插零值跟踪，与Ⅱ型和Ⅲ型滤波器的递推公式一起，在第八章中作了讨论。第九章阐述准确度和分辨力设计准则，角度坐标系采用毫弧正弦代替毫弧度，以适应电扫描雷达的应用。电扫描雷达基本误差来源估算表达式，均用表格形式概括，以便于系统分析人员应用。第十章所述的参数安排，是作者大约十五年前提出的，用合理选择各种雷达参数，以最小功率口径和最简化的设计来获得电扫描雷达系统最佳性能指标的一种方法。第十一章包括电扫描雷达的主要参数，以及运用方案及时间、功率、误差和损耗预算等，供设计和确定系统之用。第十二章提供了评定和使用系统设计的方法。第十三章论述了电扫描雷达系统的组合、试验和鉴定，重点介绍完成上述任务的方法和管理。第十四章包括一实例研究，通过一个完整的电扫描雷达系

统设计示范，逐步说明上述各章讨论内容的具体应用。实例研究从假定的威胁模型的性能要求开始，以详细的电扫描雷达系统参数表结束。这些参数表是从满足要求的设计过程中得出的。

最后，作者以及许多同行和读者都认为，由于电扫描雷达系统设计方面的文献资料特别缺乏，因此，编写这本书将多少会填补这方面的空白。

P. J. 卡里拉斯

一九七五年四月

目 录

第一章 雷达基本概念	1
1.1 雷达主要功能	1
1.2 脉冲雷达系统概述	1
1.3 距离方程推导	3
1.4 距离方程中的损耗	9
1.5 电扫描雷达距离方程的能量形式	12
1.6 雷达距离方程的应用	14
1.7 小结	18
参考资料	19
符号表	19
第二章 现代雷达发展趋向	22
2.1 雷达发展简史	22
2.2 对现代雷达的要求	24
第三章 电扫描雷达系统 (ESRS) 的特征	28
3.1 定义	28
3.2 电扫描技术	28
3.3 实现方法	36
3.4 ESRS 的优点	52
3.5 ESRS 的缺点	53
3.6 ESRS 举例	54
附录 A 相位扫描阵列的建立时间	68
附录 B 频率扫描阵列的建立时间	69
符号表	70
第四章 检测理论	73
4.1 统计判决处理	73
4.2 似然比	74
4.3 目标模型及其应用	76

4.4 各种目标模型比较	85
参考资料	101
符号表	102
第五章 匹配滤波器理论和波形	106
5.1 匹配滤波器理论	106
5.2 失配滤波器损耗	110
5.3 用于电扫描雷达的波形型式	111
参考资料	114
符号表	115
第六章 动目标显示 (MTI) 设计考虑	116
6.1 定义	116
6.2 MTI 设计公式	117
6.3 MTI 在电扫描雷达系统 (ESRS) 中的应用	124
6.4 MTI 设计举例	127
参考资料	129
符号表	129
第七章 正弦空间坐标 (阵列坐标)	132
7.1 定义	132
7.2 阵列空间坐标概述	133
7.3 单元间距与栅瓣位置	136
7.4 单元间的相差	140
7.5 波束宽度	142
7.6 倾斜角	143
7.7 阵列设计	147
7.8 搜索方向图	149
7.9 应用正弦空间坐标设计 ESR 阵列	150
参考资料	157
附录 C 阵列-空间坐标变换	157
符号表	161
第八章 电扫描雷达系统跟踪设计考虑	164
8.1 电扫描雷达跟踪特性	164

8.2	电扫描雷达跟踪环路滤波器	166
8.3	Ⅰ型和Ⅱ型数字滤波器的设计方程	169
8.4	跟踪环路设计方程的使用方法	172
	参考资料	175
	符号表	175
第九章	准确度和分辨力	177
9.1	定义	177
9.2	电扫描雷达误差源	178
9.3	分辨力	187
	参考资料	189
	符号表	190
第十章	参数安排	194
10.1	定义	194
10.2	波束宽度	194
10.3	时间	195
10.4	能量	197
10.5	波形	199
10.6	功率	200
10.7	时间和功率预算	200
10.8	占空系数	200
10.9	频率	201
	符号表	201
第十一章	电扫描雷达系统参数	202
11.1	运用方案	202
11.2	时间与功率预算	205
11.3	功能框图	207
11.4	误差与损耗预算	209
11.5	参数表	212
	参考资料	215
	符号表	215
第十二章	系统设计方法	216

12.1	方法	216
12.2	将威胁模型/性能要求变换为雷达参数	217
12.3	实时方案	218
12.4	性能分析	220
12.5	电扫描雷达系统设计选择	222
12.6	图表	227
12.7	迭代法	227
参考资料		228
第十三章 电扫描雷达系统的组装、试验和鉴定		229
13.1	计划大纲/进度表	230
13.2	主要进程	232
13.3	硬件/软件组合和试验计划	233
13.4	软件“组件”计划	235
13.5	性能验证和鉴定	236
参考资料		237
第十四章 实例研究——防空电扫描雷达系统设计		238
14.1	威胁模型和性能要求	238
14.2	搜索	239
14.3	跟踪	255
14.4	MTI——动目标显示	263
14.5	参量安排	266
14.6	防空 ESRS 的功能框图	272
14.7	防空 ESR 系统参量	272
参考资料		275
符号表		275

第一章 雷达基本概念

1.1 雷达主要功能

雷达 (RADAR) 一词是由英文 RADio Detection And Ranging 词组中取每个词的词首拼写而成, 它是用来对目标进行检测、定位 (和识别) 的一种电子设备。

雷达能发现 (检测) 处于恶劣环境 (如地物干扰、雨、霾、雾、雪、云、烟和黑夜) 的目标。雷达还能透过上述复杂环境观察 (或检测) 目标, 而不受人的正常视力所限。但它并不能代替人的眼睛。因为眼睛分辨目标细节的能力比雷达要好, 而且还能识别颜色。可是, 眼睛既不能透过恶劣环境发现目标, 也不能测量目标。雷达扩大了人们利用视觉观测环境的能力。

雷达能测量被检测目标的距离 (最重要的雷达功能)、角度 (方位和仰角) 和多卜勒速度 f_D (第四个基本量)。雷达目标位置和目标轨道可以从它们的坐标 (R, A_z, E) 及其导数 $(\dot{R}$ 或 f_D, \dot{A}_z, \dot{E} 和 \ddot{R} 或 $\dot{f}_D, \ddot{A}_z, \ddot{E})$ 计算而得。

雷达能测量与目标大小和形状有关的回波幅度, 与其它雷达测量数据综合, 可识别目标。

1.2 脉冲雷达系统概述

脉冲雷达系统简化方框图, 如图 1-1 所示。

根据测量时间可算出目标与雷达间的距离。因为电磁能量以光速传播, 故距离为

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

式中, 光的传播速度 $c = 3 \times 10^8$ 米/秒, t 是脉冲到达目标及从

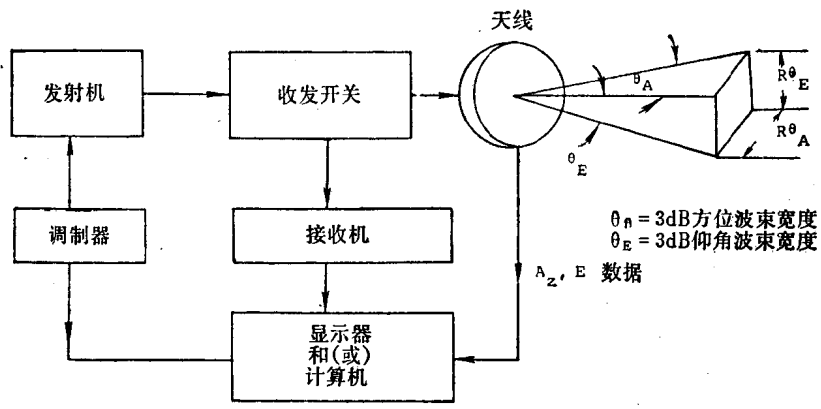


图1-1 脉冲雷达系统

目标反射回来的时间。

因此，脉冲雷达系统的距离测量，是由发射信号和接收的目标回波信号之间时间的延迟来决定。宽带脉冲波形陡峭的前沿和后沿，是时间测量的理想参考基准。下表给出了 t 和 R 的典型值。

典型值

t	R
1 微秒	150 米 = 164 码 = 492 英尺
10.74 微秒	1.0 英里
12.36 微秒	1.0 海里 = 6076 英尺

速度可由下式平滑相继的距离变化率来得到

$$\dot{R}_{12} = \frac{R_2 - R_1}{t_0} \tag{1.2}$$

或由测量多卜勒频率得到，即

$$f_D = \frac{2V}{\lambda} \tag{1.3}$$

式中 R_1, R_2 ——两相继距离测量值；
 t_0 ——脉间周期；
 V ——目标径向速度；

λ —— 发射能量波长。

加速度由下式得到

$$\ddot{R} = \frac{\dot{R}_{23} - \dot{R}_{12}}{t_0} \quad \text{或} \quad \dot{f}_D = \frac{f_{D2} - f_{D1}}{t_0} \quad (1.4)$$

$$(1.5)$$

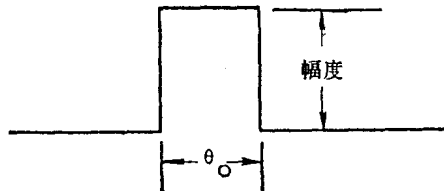
触发发射机的调制器启动雷达工作，发射机产生强烈而短暂的高频（以适当时间间隔）电磁脉冲，通过收发开关馈到天线，并由天线辐射到空间。当波束传播方向上有目标时，回波信号就反射回天线，由天线收集并通过收发开关送到接收机，经放大和检波之后，信号在显示器上被显示出来，或送到电子计算机中进行处理。利用电子计算机的时钟或精密的参考时钟，测量发射信号和接收信号之间的时间，就可以确定目标距离。

目标相对于雷达的方向，由辐射波束的方向确定，通常由天线的方位角 A_z 和仰角 E 的角坐标得到。另一方面，目标的方向和位置也能用两部雷达同时测量距离的三角形法得到。计算机（如果采用的话）供雷达自动控制 and 轨道计算用。

1.3 距离方程推导

这里简要地重复一下距离方程推导，因为它对雷达系统设计来说是十分重要的，并且强调一下影响距离预测准确度的一些基本假设。

假定图 1-1 所示的天线具有矩形波束，



图中天线波束宽度

$$\theta_0 \approx \frac{\lambda}{D} \quad (1.6)$$

(实际上 $\theta_0 = \frac{0.88\lambda}{D}$ 到 $\frac{1.3\lambda}{D}$, 根据照射坡变而定)

$D = \text{口径尺寸}$

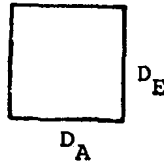
或

$$D \approx \frac{\lambda}{\theta_0}$$

天线面积

$$A_0 = D_E D_A \quad (1.7)$$

或

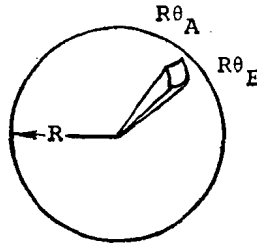


$$A_0 \approx \frac{\lambda^2}{\theta_E \theta_A} \quad (1.8)$$

设有一各向同性辐射器 (全向天线), 向空间各个方向以等强度分配其发射功率, 并且把辐射功率传播到距离 R 处围绕辐射器的假想球面 ($4\pi R^2$) 上。

从定向天线得到的增益, 等于球体表面面积与波束内面积的比值,

$$G = \frac{4\pi R^2}{R\theta_E R\theta_A} \quad (1.9)$$



将式 (1.8) 代入
得到天线面积增益

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (1.10)$$

(作为比较, 列出定向天线增益 $G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$, 见参考资料(1), 第 54 页, 式中 A_e ——最大有效口径)。

如果雷达发射机峰值功率 P_p 通过各向同性天线辐射出去, 则在距离 R 上各向同性辐射器的

$$\text{功率密度} = \frac{P_p}{4\pi R^2} \quad (1.11)$$

如果换成增益为 G_T 的定向天线, 对准目标时, 辐射功率的最大值为 P_p , 则在距离 R 上定向天线的

$$\text{功率密度} = \frac{P_p G_T}{4\pi R^2} \quad (1.12)$$

位于距离 R 上的目标, 截获辐射功率的一部分, 并且往雷达方向反射回去。由雷达目标往接收天线反射的功率大小取决于目标截面积 σ , 即雷达目标有效反射面积 (定义: 如果照射到雷达目标有效反射面积上的全部功率, 以接收天线同样的极化向各个方向均匀地散射, 则接收到的回波, 就会等于从目标反射回来的实际回波)。

故

$$\text{照射到目标上的功率} = \frac{P_p}{4\pi R^2} G_T \sigma = \text{反射功率} \quad (1.13)$$

并且, 反射到接收天线的峰值回波功率

$$S = \frac{P_p G_T \sigma}{4\pi R^2} \times \frac{1}{4\pi R^2} \times A_R = \frac{P_p G_T \sigma A_R}{(4\pi)^2 R^4} \quad (1.14)$$

↑
目标各向同性反射

而由式 (1.10)

$$A_R = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi}$$

$$\therefore S = \frac{P_p G_T G_R \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1.15)$$

$$S = \frac{P_p G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad \text{如果由同一天线发射和接收则}$$

$$G_T = G_R = G \quad (1.16)$$

式 (1.14)、(1.15) 和 (1.16) 是精确的，并且不取决于矩形口径假定。如果 A_R 定义为接收天线的有效面积，则式 (1.10) 是精确的。

噪 声

雷达检测目标回波信号的能力，由占据与信号能量同一频谱的噪声能量所限制。在微波频段 (200~60000 兆赫) 人为的和从空间而来的天线噪声是次要的，而热噪声是限制雷达性能的主要因素。

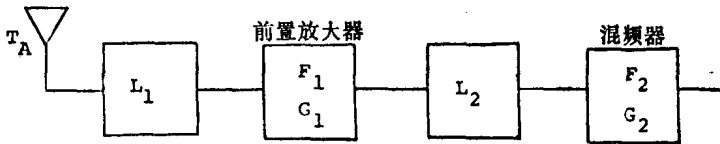
$$\text{噪声功率} = N = kT_s B_N \quad (1.17)$$

式中 k —— 波尔兹曼常数 1.38×10^{-23} 瓦/(赫 × 绝对温度)；

T_s —— 折合到天线表面的系统噪声温度 (绝对温度)；

B_N —— 中频滤波器噪声带宽 (基于对匹配滤波器的分析，按 $1/\tau$ 计算，其中 τ 为脉冲宽度)。

折合到天线表面的系统噪声温度



$$T_s = T_A + T_0 \left[(L_1 - 1) + L_1(F_1 - 1) + \frac{L_1(L_2 - 1)}{G_1} + \frac{L_1 L_2(F_2 - 1)}{G_1} + \dots \right] \quad (1.18)$$

通常 $G_1 \geq 20$ 分贝

于是

$$T_s \approx T_A + T_o(L_1 F_1 - 1) \quad (1.19)$$

式中 T_A ——天线天空噪声温度（绝对温度）（星系加氧和水汽）；

T_o ——环境温度（绝对温度），通常为 290°K ；

L_1 ——接收天线欧姆损耗加微波损耗（天线欧姆损耗包括天线罩、馈源……；微波损耗包括旋转关节、双工器/环流器、波导/电缆、射频开关、收发转换开关和/或限幅器）；

F_1 ——前置放大器噪声系数；

G_1 ——前置放大器增益；

L_2 ——前置放大器和混频器之间的损耗（带通滤波器、射频开关、波导/电缆）；

F_2 ——混频器噪声系数；

G_2 ——混频器变换增益/损耗。

实际系统的雷达方程，可由式（1.16）除以式（1.17），并计入损耗系数 L （计算系统损耗）得出：

$$\frac{S}{N} = \frac{P_p G_T G_R \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L k T_s B_N} \quad (1.20)$$

为避免对天线增益和天线效率的不同定义而使含义混淆，在雷达方程中各个术语采用下列定义：

$$G_T \text{——发射天线面积增益} = \frac{4\pi A_T}{\lambda^2};$$

$$G_R \text{——接收天线面积增益} = \frac{4\pi A_R}{\lambda^2};$$

A_T ——发射口径物理面积（米²）；

A_R ——接收口径物理面积（米²）；

L ——系统噪声温度中未包括的系统损耗，如：

1. 发射天线损耗：照射坡变、天线罩、漏泄、阻挡、馈源；
2. 接收天线非耗散损耗：照射坡变、漏泄、阻挡；
3. 系统衰变；