

 电子信息与电气学科规划教材 · 电子信息科学与工程类专业

相控阵雷达

数据处理教程

蔡庆宇 张伯彦 曲洪权 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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



相控阵雷达

数据处理器软件

张卫华 王明华 王明华 著

国防工业出版社

电子信息与电气学科规划教材·电子信息科学与工程类专业

相控阵雷达数据处理教程

蔡庆宇 张伯彦 曲洪权 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从相控阵雷达和滤波理论的一般原理出发,系统地论述了相控阵雷达数据处理的理论与方法,并涉及了这一领域的崭新研究成果。全书共 7 章,主要内容包括相控阵雷达技术及数据处理概述、线性系统的最优估计、非线性滤波、机动目标数据处理专题研究、复杂环境目标跟踪的数据处理、相控阵雷达工作方式调度的专题研究,以及相控阵雷达数据处理的仿真技术。精选的附录 A、B、C 的内容是雷达数据处理必备的理论基础,也便于读者查找有关资料。

本书可作为高等院校电子信息工程、自动控制专业本科、研究生教材,也可作为交通管制、通信工程等专业师生的参考书,是从事雷达系统设计和数据处理工作的工程技术人员及雷达部队的重要培训教材和设计必备的参考资料。

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。

图书在版编目(CIP)数据

相控阵雷达数据处理教程 / 蔡庆宇, 张伯彦, 曲洪权著. —北京: 电子工业出版社, 2011.3

电子信息与电气学科规划教材·电子信息科学与工程类专业

ISBN 978-7-121-12810-3

I. ①相… II. ①蔡… ②张… ③曲… III. ①相控阵雷达—数据处理—高等学校—教材 IV. ①TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 010300 号

策划编辑: 段丹辉

责任编辑: 段丹辉 特约编辑: 龙继文

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

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: 18.75 字数: 492 千字

印 次: 2011 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 49.00 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 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

序

本书是一本工程研究院所科研人员编著的研究生教材。

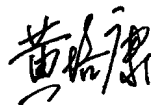
科研单位的研究生教育是中国研究生教育体系中的重要组成部分。中国航天科工集团第二研究院(简称“中国航天二院”)开展学位与研究生教育工作已逾 30 年。多年来,在研究生培养的教学实践中,授课教师 and 教学人员都深感缺少满足教学需要的适用教材,尤其在理论与实践紧密结合方面缺乏工程性与实践性。为此,在相关领导、专家的支持和鼓励下,中国航天二院研究生院启动了研究生教材的建设工作,鼓励由实践经验丰富的科学研究人员独立或与高等院校教师合作编著研究生教材。

雷达作为一种传感器,对遥感目标进行检测、跟踪、识别和参数估计,它不但要回答目标在哪里、是什么,而且要预测目标未来的轨迹、识别目标的特性。相控阵雷达具有电控波束和多波束跟踪等优点,已成为现代雷达的一种主要体制。同时,相控阵雷达对它的终端——雷达信号与数据处理提出了更高更新的要求。

本书首先从雷达数据处理系统特点和滤波基本理论出发,阐述了线性系统的最优估计理论和设计,接着详细介绍了非线性系统的各类近似滤波方法,在此基础上重点探讨了工程中常用的几种跟踪机动目标的有效算法和跟踪多目标的数据关联方法,将现代数字滤波理论与雷达系统理论紧密结合,并在雷达工程实践中应用。本书主要作者蔡庆宇研究员,从事航天科学研究 50 年,并在中国航天二院研究生院授课多年,经验丰富、治学严谨,学术造诣高。本教材是他多年科研成果的结晶,并已多年在授课中使用。因此,本书不但具有很好的基础性与系统性,而且充实了它的工程性与实践性。为此,我竭力推荐。

蔡庆宇研究员年事已高,工作繁忙,还要在百忙中高质量地进行教材撰写,充分体现了他对人才培养的极大热忱和关注。我谨代表中国航天二院研究生院向蔡庆宇研究员致以崇高的敬意!向另外两位参与教材撰写工作的张伯彦研究员、曲洪权讲师一并表示衷心的感谢!

中国工程院院士



中国航天二院研究生院

二〇一一年一月

前 言

为了满足中国航天二院研究生院教学的需要,增强培养应用型人才的有效性,我们编写了这本教材。本书是关于相控阵雷达数据处理及其应用的一部专著,是作者从事航天科研工作 50 年来研究成果的总结和展示。本书从相控阵雷达和滤波理论的一般原理出发,系统地论述了相控阵雷达数据处理的理论与方法,并涉及了这一领域新的研究成果。

全书由 7 章组成。第 1 章具有导论性质,概述了相控阵雷达发展的概况及其数据处理的特点、组成及应用举例。第 2 章是线性系统的最优估计,介绍了线性系统的可控性、可观测性、稳定性,介绍了各种线性滤波方法并涉及工程设计技术。第 3 章讨论非线性滤波,涉及了当今广泛流行的一些滤波方法及设计问题。第 4 章是机动目标数据处理专题研究且偏重于实践应用。第 5 章为复杂环境中目标跟踪的数据处理,涉及干扰环境下的多目标跟踪、群目标的跟踪逻辑及舰载目标跟踪。第 6 章是相控阵雷达工作方式调度的专题研究,这是相控阵雷达数据处理有别于其他雷达体制中数据处理的特殊问题,包括雷达自适应调度的策略、变采样间隔跟踪及专家系统的应用等。第 7 章介绍了相控阵雷达数据处理的仿真技术,涉及仿真的系统建模、仿真软件总体设计及具体的目标情景想定的仿真、雷达测量的仿真等。附录 A 为矩阵分析,附录 B 为随机过程,附录 C 为数理统计,这些精选的附录内容是雷达数据处理必备的理论基础,也便于读者查找有关资料。

本书可作为高等院校电子信息工程、自动控制专业本科、研究生的教材,也可作为交通管制、通信工程等专业师生的参考书,同时也是从事雷达系统设计和数据处理工作的工程技术人员及雷达部队开展培训的重要教材和进行设计的必备参考资料。

本书由蔡庆宇研究员、张伯彦研究员、曲洪权讲师共同撰写完成。在撰写过程中得到了中国工程院黄培康院士和航天二院研究生院的热情鼓励和大力支持,历届学生也提出了许多宝贵意见,电子工业出版社的段丹辉编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此作者一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,难免有疏漏与不当之处,敬请读者提出批评指正。作者的邮箱:bjcaicai@163.com。

作 者

二〇一〇年十一月

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 相控阵雷达技术概述	(1)
1.1.1 相控阵雷达的发展概况	(1)
1.1.2 相控阵雷达的基本组成及工作过程	(2)
1.1.3 相控阵雷达天线及电扫描技术	(2)
1.2 相控阵雷达数据处理技术	(4)
1.2.1 相控阵雷达中的嵌入式数字计算机的特点	(4)
1.2.2 相控阵雷达中的计算机软件系统	(5)
1.2.3 相控阵雷达数据处理系统的功能与特点	(6)
1.3 相控阵雷达数据处理系统的应用举例	(9)
1.3.1 一个相控阵雷达数据处理系统在防空系统中的应用	(9)
1.3.2 典型的相控阵雷达数据处理系统在舰船指挥系统中的应用	(11)
参考文献	(14)
第 2 章 线性系统的最优估计	(16)
2.1 引言	(16)
2.2 随机估计的一般方法	(16)
2.2.1 估计问题的构成	(16)
2.2.2 最小二乘估计	(17)
2.2.3 最小均方误差估计	(18)
2.2.4 极大似然估计	(19)
2.2.5 极大后验估计	(20)
2.2.6 最小线性均方误差估计	(20)
2.2.7 递推最小二乘估计	(22)
2.3 线性系统的滤波方法	(25)
2.3.1 状态估计问题	(25)
2.3.2 离散线性系统的卡尔曼滤波	(25)
2.3.3 卡尔曼滤波的基本性质	(28)
2.3.4 连续时间系统的连续描述与离散描述的关系	(29)
2.4 线性系统的可观测性和可控性	(30)
2.4.1 系统的可观测性	(30)
2.4.2 系统的可控性	(35)
2.5 线性系统滤波器的稳定性	(37)
2.5.1 稳定性的一般概念介绍	(37)

2.5.2	离散最佳滤波器的稳定性	(40)
2.6	线性系统滤波器的误差特性	(42)
2.6.1	滤波器误差协方差矩阵 P 的上下界	(42)
2.6.2	滤波器误差协方差矩阵的渐近性	(45)
2.7	线性系统滤波器的模型误差的灵敏度分析	(47)
2.8	滤波器的真实发散和模型误差补偿技术	(52)
2.8.1	发散的例子及其分析	(52)
2.8.2	限定下界法	(53)
2.8.3	伪随机噪声法	(55)
2.8.4	增益的直接加权	(56)
2.8.5	扩张状态法	(56)
2.8.6	衰减记忆	(57)
2.8.7	限定记忆法	(57)
2.9	目标运动模型	(58)
2.9.1	常速度模型	(58)
2.9.2	常加速度模型	(59)
2.10	常增益滤波器	(60)
2.10.1	常增益滤波器的设计	(60)
2.10.2	α - β 滤波器	(61)
2.10.3	α - β - γ 滤波器	(65)
2.11	小结	(66)
	思考题	(67)
	参考文献	(69)
第3章	非线性非高斯滤波	(71)
3.1	引言	(71)
3.2	近似高斯化的卡尔曼滤波	(71)
3.2.1	扩展卡尔曼滤波(EKF)	(72)
3.2.2	转换观测卡尔曼滤波(CMKF)	(76)
3.2.3	Unscented 卡尔曼滤波(UKF)	(77)
3.3	近似高斯化滤波方法在相控阵雷达目标跟踪中的应用	(79)
3.3.1	坐标系、测量模型及状态模型	(79)
3.3.2	混合坐标系下 EKF 滤波和 UKF 滤波	(81)
3.3.3	笛卡儿坐标系下 CMKF 滤波	(82)
3.4	非高斯分布的直接估计(粒子滤波)	(82)
3.5	小结	(83)
	思考题	(84)
	参考文献	(84)
第4章	机动目标跟踪	(85)
4.1	引言	(85)

4.2	新息序列(Innovation)的基本性质	(85)
4.3	单模型方法	(90)
4.3.1	相关噪声模型——Singer 模型	(90)
4.3.2	机动目标的截断正态概率密度模型	(92)
4.4	串行多模型方法	(101)
4.4.1	调整过程噪声的方法	(101)
4.4.2	输入估计方法	(102)
4.4.3	变维数滤波方法	(104)
4.4.4	检测及状态自适应调整滤波器	(107)
4.4.5	修正的常增益自适应滤波方法	(113)
4.5	并行多模型方法(IMM)	(120)
4.5.1	方法描述	(120)
4.5.2	静态多模型估计器	(120)
4.5.3	动态多模型估计器	(122)
4.5.4	GPB1 多模型估计器(切换模型)	(124)
4.5.5	GPB2 多模型估计器(切换模型)	(125)
4.5.6	交互式多模型估计器(IMM)	(127)
4.6	小结	(131)
	思考题	(132)
	参考文献	(132)
第 5 章	复杂环境中的目标跟踪	(136)
5.1	引言	(136)
5.2	测量的证实	(136)
5.3	干扰环境中的单目标跟踪	(138)
5.3.1	最近邻域滤波法(NNF)	(138)
5.3.2	概率数据关联滤波器(PDAF)	(138)
5.4	在干扰环境下的多目标跟踪	(142)
5.5	模糊子集理论在多目标跟踪中的应用	(144)
5.5.1	模糊最小方差估计	(145)
5.5.2	多目标跟踪的模糊滤波算法	(146)
5.5.3	模糊关系矩阵和隶属矩阵	(149)
5.5.4	仿真实验结果	(150)
5.6	编队飞行目标群的跟踪逻辑	(150)
5.6.1	问题的提出	(150)
5.6.2	群目标数据处理系统的逻辑功能	(151)
5.7	运动载体环境下的目标跟踪问题	(159)
5.7.1	舰载雷达跟踪问题概述	(159)
5.7.2	参照系及坐标系	(159)
5.7.3	相对速度与相对加速度的推导	(163)

5.7.4 舰载雷达跟踪系统框图和仿真试验	(166)
5.8 小结	(168)
思考题	(169)
参考文献	(169)
第 6 章 相控阵雷达数据处理专题研究	(171)
6.1 引言	(171)
6.2 稠密多目标航迹初始化方法	(171)
6.2.1 分群处理	(171)
6.2.2 航迹初始化	(173)
6.2.3 一个工程应用实例	(176)
6.3 相控阵雷达工作方式的调度策略	(178)
6.3.1 概述	(178)
6.3.2 影响调度策略的主要因素	(178)
6.3.3 自适应调度策略	(180)
6.3.4 调度程序的设计方法	(182)
6.3.5 仿真试验结果	(186)
6.4 相控阵雷达数据率的自适应控制	(186)
6.4.1 常增益变采样间隔滤波器	(187)
6.4.2 变采样间隔算法	(188)
6.4.3 仿真结果及结论	(189)
6.5 专家系统及其在相控阵雷达数据处理系统中的应用	(191)
6.5.1 专家系统发展概况	(191)
6.5.2 专家系统的研究对象和结构	(191)
6.5.3 一个相控阵雷达工作方式调度的专家系统——SOMPAR 专家系统	(192)
6.6 小结	(195)
思考题	(196)
参考文献	(196)
第 7 章 系统仿真技术	(197)
7.1 引言	(197)
7.2 仿真系统的硬件环境	(197)
7.3 系统仿真建模方法学	(198)
7.3.1 系统仿真建模步骤	(198)
7.3.2 确定系统仿真软件总体方案	(199)
7.4 系统运动模型的仿真	(200)
7.4.1 目标运动模型的仿真	(200)
7.4.2 测量过程的仿真	(202)
7.4.3 跟踪滤波及航迹管理	(207)
7.5 小结	(213)
7.6 附录: 噪声协方差矩阵 $\mathbf{R}(k)$ 与初始协方差矩阵 $\mathbf{P}(0/0)$ 的计算	(214)

思考题	(219)
参考文献	(219)
附录 A 矩阵分析介绍	(220)
A.1 状态空间概念	(220)
A.1.1 纯量微分方程的状态空间描述	(220)
A.1.2 状态空间的定义	(221)
A.2 向量空间和矩阵运算	(222)
A.2.1 线性空间定义	(222)
A.2.2 线性相关与线性独立	(223)
A.2.3 内积与范数	(224)
A.2.4 n 维欧氏空间的向量运算	(226)
A.2.5 矩阵的秩	(228)
A.2.6 矩阵运算	(229)
A.3 矩阵的典型表示与正定阵	(236)
A.3.1 矩阵的典型表示	(236)
A.3.2 矩阵的特征值和特征向量	(237)
A.3.3 正定矩阵的定义及其有关性质	(238)
A.4 矩阵函数与矩阵方程	(244)
A.4.1 矩阵函数及凯莱-哈密顿定理	(244)
A.4.2 矩阵的范数	(245)
A.4.3 矩阵级数	(245)
A.4.4 齐次向量微分方程的解	(247)
A.4.5 e^{At} 的计算方法	(249)
A.4.6 一般阵 A 化为约当标准型 J	(251)
A.4.7 非齐次向量微分方程的解	(252)
A.4.8 矩阵 Riccati 方程及其解	(253)
A.4.9 矩阵差分方程及其解	(255)
参考文献	(256)
附录 B 随机过程的初步介绍	(257)
B.1 基本概念	(257)
B.1.1 随机过程的定义	(257)
B.1.2 $X(t)$ 的有限维分布族	(257)
B.2 一些特殊过程	(257)
B.2.1 平稳随机过程	(257)
B.2.2 正态过程	(258)
B.2.3 马尔可夫过程	(259)
B.2.4 二阶矩过程	(259)
B.2.5 维纳过程(布朗运动)	(262)
B.3 平稳过程的谱的概念	(263)
B.3.1 平稳过程的谱	(263)

B.3.2 白噪声	(264)
参考文献	(265)
附录 C 数理统计	(266)
C.1 基本概念	(266)
C.2 抽样分布	(266)
C.2.1 子样矩的数字特征	(266)
C.2.2 χ^2 分布	(267)
C.2.3 学生氏 t 分布	(267)
C.2.4 Fisher 引理	(268)
C.2.5 统计量	(268)
C.2.6 二子样统计量	(268)
C.3 参数估计	(269)
C.3.1 参数的点估计	(270)
C.3.2 区间估计	(279)
C.4 假设检验	(282)
C.4.1 显著性检验	(283)
参考文献	(288)

第 1 章 概 述

1.1 相控阵雷达技术概述

在进行相控阵雷达数据处理研究之前，我们有必要对相控阵雷达技术做一简明扼要的概述。首先介绍相控阵雷达的发展概况，然后给出相控阵雷达的基本组成及其工作过程，最后叙述相控阵雷达的天线及电扫描技术。

1.1.1 相控阵雷达的发展概况

相控阵雷达是一种多功能、高性能的新型雷达，是客观需要和科技发展到一定阶段的产物。20 世纪 50 年代以后，由于各种高速飞行器——导弹、洲际导弹和人造卫星等的出现，对雷达提出了两个要求：第一是作用距离要远，能发现和测量 5000 km 外的目标；第二是天线波束扫描要快，能跟踪速度为音速 20 倍的目标，并缩短控制反应时间，提高跟踪速度。对于第一个问题，一般来说只要加大天线面积和无线电波的发射功率，以及减少接收机噪声就可解决。但对于第二个问题，对机械扫描的常规雷达(称为第一代雷达)来说，已不能胜任。因为机械扫描雷达其天线和波束是一起转的，直径达几十米、质量达几百吨的天线转一圈往往要几秒钟。因此，在 50 年代，为了改变雷达扫描技术落后的面貌，人们提出了应用电扫描技术来改进机械扫描技术，并开始研制电扫描雷达波束指向系统，它标志着第二代雷达的产生。这种雷达的突出优点是，在搜索和跟踪目标时，整个天线系统可以固定不动，天线波束指向不必用机械伺服系统来控制，而是通过控制阵列天线中各个单元的相位，得到所需的天线方向图和波束指向，使波束在一定的空域中按预定规律进行扫描。由于不存在机械运动惯性，改变波束指向所需控制时间就很短，大约需十几微秒，是常规雷达反应时间(大约几秒)的几十万分之一。

在 20 世纪 60 年代，随着各种新型微波电子元器件(如铁氧体、二极管开关移相等)的产生，数字电子计算机的发展、应用，以及近代控制理论的出现，电扫描控制波束系统得到了很大发展。归纳起来，实现电扫描有两种方法：一种方法是通过控制阵列天线中各个单元的相位，得到所需的方向图和波束指向，这种雷达称为相控阵雷达；另一种方法是通过雷达工作频率的变化来控制阵列天线中各单元的相位，得到所需的方向图和波束指向，这称为频率扫描，采用这种电扫描方法的雷达称为频扫雷达。60 年代中期，投入研制的有机载相控阵雷达和地面大型相控阵雷达等。60 年代末，由于机载雷达要求向多目标和多功能方向发展，因此研制了全固态化多功能的机载相控阵雷达。70 年代初期，出现了大功率、大孔径和高精度的大型相控阵雷达系统。到 70 年代中期，人们利用相控阵雷达系统中的电扫描技术，进行电子系统综合化，即扩大其应用范围，用一部相控阵雷达实现多部雷达的功能。

目前，相控阵雷达已发展成为具有多功能、多目标、远距离、高数据率、高可靠性和高自适应能力的一种重要雷达，而且也是唯一可用于对付高动态性能多目标的战略防空雷达，由于其多功能、高性能和体积小(相对多部雷达)，因此也大量应用于飞机和舰船上。

1.1.2 相控阵雷达的基本组成及工作过程

相控阵雷达的基本组成可分为相控阵天线、波束控制计算机、发射机和接收机、激励器、信号处理与录取器、控制计算机等主要部分，外加雷达与计算机之间的接口、外设、显控及整机电源等设备，其简化组成框图如图1.1.1所示。

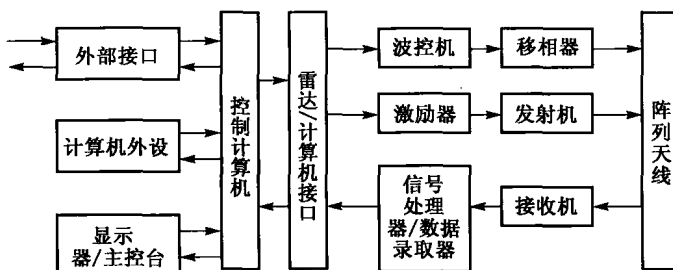


图 1.1.1 相控阵雷达的基本组成

相控阵雷达的典型工作过程是：外部指令（可由外部接口或由主控台）输入到控制计算机，控制计算机通过雷达与计算机接口单元控制和处理雷达信号。控制计算机根据外部指令和经过数据处理后有关目标的位置坐标等，产生雷达波束驻留指令，包括波束的角位置、发射时间、频率、波形、脉冲周期、检测门限等参数及波束驻留标志等信息，并将这些指令经雷达与计算机之间的接口送往波束控制计算机。波束控制计算机根据波束驻留指令计算出每个移相器的相位，使天线阵列中的各个单元具有适当的相位移，以便形成指定方向的波束。

同时，在激励器中产生适宜的工作波形和载波频率信号，然后经变频或倍频处理，升高到发射的载频，在发射机中放大到一定的功率，送至阵列天线。在阵列天线中经移相器移相，使发射的波束处于波束驻留指令要求的方向上。

在接收机输出端得到的回波信号，在信号处理与数据录取中经过恒虚警处理、自动调整门限电平、动目标检测等各种抑制杂波、增强有用信号的处理后已变成数字量，这些数据经雷达与计算机接口设备进入控制计算机。

计算机对于收到的这些波束驻留回波数据依相应的波束驻留目的来进行处理。例如，对搜索数据的处理不同于对跟踪数据的处理。因为在搜索工作方式下系统只是试图确定目标是否存在，而跟踪方式则要求精密估计目标的参数。在搜索时，一旦信号超过设定的门限水平，就声明发现目标，并开始截获跟踪工作方式。在跟踪时，通常目标的位置和速度是要估计的最少参数。为了实时得到目标当前位置、速度及预测位置的最佳估计值，通常采用一组递推算法，可以是卡尔曼(Kalman)滤波方程，也可以是 $\alpha-\beta$ 滤波方程，并用计算机程序实现，从而形成采样数据的电子伺服回路来完成跟踪功能。

控制计算机输出的数据，经过外部接口设备送往指挥所，并记录在磁带或磁盘上，以便做进一步分析，同时送往显示器，并把有关数据显示到综合平面显示器上，并与主控台进行信息交换。

1.1.3 相控阵雷达天线及电扫描技术

相控阵雷达天线是由许多辐射单元组成的。辐射单元可以是偶极子、开口波导、波导上的裂缝或其他类型的天线^[1, 2]。这些辐射单元适当分布于某一直线或某一面。所以，辐射单元都排列在一条直线上的称为线阵列^[3]，排列在一个面上的称为面阵列。一种常用的相控

阵雷达天线是辐射单元分布于平面上的天线，称为平面阵列。此外，还有辐射单元分布于非平面表面，如球面上的共形阵列天线。

现代雷达所使用的阵列天线，主要是电控制扫描的。由于阵列天线是由许多单元排成阵列组成的，方向图取决于每个单元上的电流分布，因此改变电流分布就能够改变天线的方向图和波束指向。在扫描过程中，整个天线孔径保持固定，即天线本身不需要做机械运动，而是通过电的方法来控制电磁波束的扫描，故称为电扫描。因此没有机械扫描的惯性，还可以实现多个独立波束并行工作，提供较高的数据率。电扫描的出现，是现代雷达的一大进展，阵列天线正是在电扫描意义上得到了广泛应用。

目前阵列天线实现电扫描，主要是相位控制扫描。就是通过控制阵列天线中各个单元上电流的幅度和相位，得到所需的方向图和波束指向。此外，还有其他的电扫描方法，如频率控制扫描等。

下面以简单线阵为例，讨论阵列天线的基本原理和相位控制扫描原理。通过线性阵列天线理论分析，可把结果推广至二维或三维辐射元分布的情况。

1. 阵列天线的基本原理

阵列天线的工作原理^[1]与抛物面天线或透镜天线不同，阵列天线不是利用抛物面等具有特殊几何形状的设备来校正照射源的波前来得到平面波，而是利用移相器控制每个辐射单元的相位(包括波前校正)，使之成为平面波，从而得到指定方向上的方向图。因此，在分析阵列天线时，必须知道各个辐射单元上相位的相对关系。

下面分析一个间距为 d 的 N 个单元所组成的线阵， n 是与线阵垂直的法线，如图 1.1.2 所示。

假定各单元是同幅等相激励。相邻两个单元间由于距离差而引起的相位差为

$$\phi = (2\pi/\lambda)d \sin \theta \quad (1.1.1)$$

为方便起见，设每个单元上激励的幅度为 1，相位为零，以第一个单元为参考，则 N 个单元在 θ 方向上合成的场强为

$$E(\theta) = 1 + e^{-j\phi} + e^{-j2\phi} + \dots + e^{-j(N-1)\phi} = \frac{1 - e^{-jN\phi}}{1 - e^{-j\phi}} \quad (1.1.2)$$

场强方向图是式 (1.1.2) 的幅度部分，即

$$|E(\theta)| = \left| \frac{\sin \frac{N\phi}{2}}{\sin \frac{\phi}{2}} \right| = \frac{\sin \left(\frac{N\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)}{\sin \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)} \quad (1.1.3)$$

当分子为零，即 $N\pi(d/\lambda)\sin\theta = 0, \pm\pi, \pm2\pi, \dots, \pm n\pi$ (n 为整数) 时，方向图取为零值。但当 $\pi(d/\lambda)\sin\theta = 0, \pm\pi, \pm2\pi, \dots, \pm n\pi$ 时，分母为零，同时分子也为零，则场强方向图的值为不定数。应用洛必达 (L'Hospital) 法则，可求得当 $\pi(d/\lambda)\sin\theta = \pm n\pi$ ，即 $\sin\theta = \pm n\lambda/d$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 时，场强幅度达到最大值并等于 N 。定义 $\sin\theta = 0$ 时最大值为主瓣，其他的大值为栅瓣，当然栅瓣是不希望有的。当单元间距取为半波长，即 $d = (1/2)\lambda$ 时，由于 $\sin\theta > 1$ 不成立，因此在实空间不出现栅瓣^[1]。

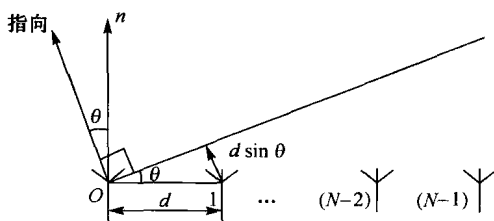


图 1.1.2 线阵的基本原理

如上所述, 在 $\theta=0$ 时, $|E(\theta)|=N$ 取得最大值, 说明同相馈电的线阵列, 其法线方向是它的最大辐射方向, 在这个方向上, 各单元所提供的电场在远处是同相相加的^[3]。

2. 相位控制扫描工作原理

如果在每个辐射单元后面接一个可变移相器, 它们的相位可在 0 到 2π 之间调整, 则可以控制阵列的主瓣指向, 如图 1.1.3 所示。

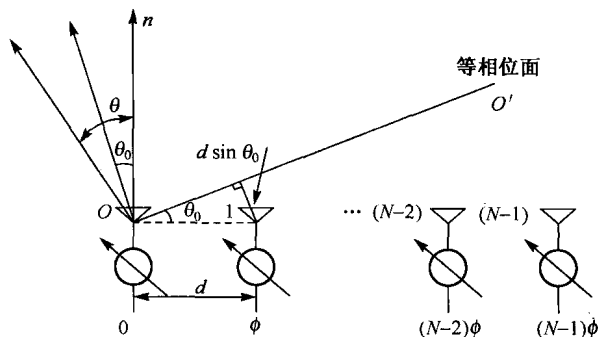


图 1.1.3 相位控制扫描工作原理

在同相馈电时, 最大辐射方向是法线方向, 如果要求在偏离法线角度 θ_0 方向获得最大辐射, 只要对各单元的馈电预先有一个相位增量以抵消各单元间的波程差引起的相位差, 就能在 OO' 平面上得到同相的场, 从而保证 θ_0 方向有最大的辐射。假设每个单元上激励的幅度为 1, 相位增量为 ϕ , 以第一个单元为参考, 则 N 个单元在 θ 方向合成的场强为

$$E(\theta) = 1 + e^{-j(\phi - \phi_0)} + e^{-j2(\phi - \phi_0)} + \dots + e^{-j(N-1)(\phi - \phi_0)} \quad (1.1.4)$$

式中, $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$ 是相邻两单元上馈电的相位增量; $\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_0$ 是相邻两单元在 θ_0 方向的波程差 $d \sin \theta_0$ 所引起的相位差。

取式 (1.1.4) 的绝对值, 得到

$$|E(\theta)| = \frac{\sin \left[\frac{N\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{\sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \quad (1.1.5)$$

当 $\theta = \theta_0$, 即当相邻单元上的馈电相位增量 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_0$ 时, 出现辐射的最大值。改变移相器的相位, 则波束可在任意 θ_0 方向获得最大值, 而一个阵面的扫描范围通常限制在 $\pm 60^\circ$ 之内^[3]。

1.2 相控阵雷达数据处理技术

本节首先介绍相控阵雷达中的嵌入式数字计算机的特点, 然后讨论相控阵雷达的计算机软件系统, 最后论述相控阵雷达数据处理的功能和特点。

1.2.1 相控阵雷达中的嵌入式数字计算机的特点

在相控阵雷达中, 数字计算机作为一个必不可少的组成部分, 主要完成以下任务。

(1) 产生波束驻留指令, 包括波束的角位置、发射时间、频率、波形、脉冲周期、检测门限和波束驻留标志等;

(2) 处理雷达回波数据, 包括检测、跟踪及相关数据;

(3) 为用户提供所需要的数据;

(4) 使雷达和计算机资源与整个任务负载相匹配;

(5) 对雷达进行自检及故障定位等。

此外, 数字计算机还对专门用来完成移相指令的波束控制计算机和信号处理机等实施统一控制。因此, 执行上述功能的数字计算机又称为雷达控制器^[4], 也称为嵌入式计算机系统, 其具有如下特点。

(1) 相控阵雷达中的嵌入式数字计算机必须为多用户服务, 又必须支持雷达的多功能, 计算机常常处于多任务并发运行的状态, 因此要求计算机具有多处理机的体系结构, 并采用“分时终端”操作, 以便同时完成大量处理任务。

(2) 由于计算机必须完成高优先级实时任务, 因此要求计算机具有处理时间短的特点, 为满足这一要求, 嵌入式计算机常常做成专用机或者选择满足实时要求的通用计算机。

(3) 由于计算机必须为用户提供足够的显示信息, 同时也接收外部干预指令, 因此必须具有方便、灵活适宜的人机接口。

(4) 绝对的可靠性是防空作战雷达系统、空中交通管制雷达、港口雷达所必须具备的性能。由于相控阵雷达的工作流程是按照预先编好的程序在计算机上执行, 因此不仅要求计算机软件具备容错技术, 而且从硬件上要求有热备份及降级使用的功能, 从而满足其可靠性的要求。

1.2.2 相控阵雷达中的计算机软件系统

大多数复杂计算机程序的基本系统结构都是模块式的, 并且由三个部分组成: 任务程序、操作系统和公用数据库。操作系统是管理计算机资源(包括 I/O 设备、存储器等), 为计算机的操作、调整和使用服务的系统软件, 常常是在确定硬件结构的同时进行研制的, 当然也有些硬件系统提供的操作系统软件具有开放性, 用户可根据需要进行剪裁; 公用数据库是计算机存储器的文件或表的集合, 可供其他程序存取数据使用, 这部分程序也常常是计算机出厂时已具备的软件, 当然也可根据需要, 建立专用的实时数据库。任务程序是根据雷达的功能和计算机必须完成的任务所研制的任务软件。各种雷达的功能不同, 所需的任务软件也不同。因此, 我们侧重关心的是计算机软件系统中的任务软件部分。通常所说的相控阵雷达中的计算机软件也特指该部分。任务程序依据功能的相似性、操作频率的高低和接口间信息量的大小等因素划分为若干程序模块, 如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1 计算机任务程序分块结构

控制功能模块	(1) 搜索与检测模块 (2) 雷达调度模块 (3) 跟踪处理模块 (4) 目标识别模块
保证功能模块	(1) 初始化模块 (2) 自检与后台自检模块 (3) 监测、诊断和维护模块 (4) 记录显示模块 (5) 计算机与用户、计算机与雷达之间的接口模块

如上所述, 将任务程序分为控制功能模块和保证功能模块两类。4 个控制子程序在 5 个