



国防电子信息技术丛书

Antenna Array Theory and Engineering Applications

阵列天线理论与 工程应用

王 建 郑一农 何子远 编著



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

阵列天线理论与工程应用

王 建 郑一农 何子远 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

在把握阵列天线理论体系的基础上,本书重点介绍经典的、实用的分析与综合方法,为了使理论与工程实际相结合,书中采用相关综合方法设计的实际阵列天线,包括实物照片或仿真模型、仿真结果和实测结果。本书共9章,主要内容包括:直线阵列及其分析、直线阵列的综合理论与方法、平面阵列及其分析、平面阵列的综合理论与方法、阵列天线的优化综合理论与方法、相控阵天线原理、阵列天线的稀疏技术理论与方法、大间距平面阵栅瓣抑制的理论和方法,以及阵列天线的工程设计等。本书提供配套电子课件。

本书可作为高等学校通信专业高年级本科生和研究生相关课程的教材,也可供相关领域科技工作者学习参考。

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

阵列天线理论与工程应用/王建,郑一农,何子远编著. —北京:电子工业出版社,2015.5

ISBN 978-7-121-25462-8

I. ①阵… II. ①王… ②郑… ③何… III. ①阵列天线—高等学校—教材

IV. ①TN82

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第021736号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:周宏敏

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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:24 字数:727千字

版 次:2015年5月第1版

印 次:2015年5月第1次印刷

定 价:69.00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 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

虽然涉及阵列天线理论方面的专业书籍很多，其中也不乏优秀的专业书籍，但阵列天线只是众多专业书籍中的少部分内容。从英文书籍看，并无专门的阵列天线分析与综合方面的书籍，一般只是天线类书籍中的几章涉及阵列天线理论的内容。如 Robert S. Elliott 和 W. L. Stutzman 的同名书籍 *Antenna Theory and Design*, C. A. Balanis 的 *Antenna Theory Analysis and Design*, 以及 R. C. Hansen 的 *Phased Array Antennas* 等。从中文版天线类书籍看，多数只是少量涉及到阵列天线的內容，如束咸荣等的《相控阵雷达天线》、张祖稷等的《雷达天线技术》，天线原理与设计类教材更是如此。阵列天线方面的专著较少，都是以教材类形式出现的。目前来看，比较专业的此类教材主要有三本，其中最具代表性的是吕善伟 1988 年所著的《天线阵综合》，还有汪茂光等 1989 年所著的《阵列天线分析与综合》，以及薛正辉等 2011 年所著的同名书籍。

出于专业性、系统性以及理论与工程相结合等方面的考虑，作者编撰了这本《阵列天线理论与工程应用》专业书籍。本书是在作者合作团队十五年阵列天线教学及长期从事科研工作基础上编写的，作者团队深知在阵列天线理论方面学生或初学者想学到什么和应该掌握什么。

相对于其他专业书籍，本书在内容上有所取舍，尽量采用经典、有效及符合现代计算平台的主流阵列天线分析与综合方法，并增加了一些实用、现代的综合设计方法。全书共分 9 章，包括直线阵列的分析、直线阵列的综合、平面阵列的分析、平面阵列的综合、阵列天线的优化综合、相控阵天线原理、密度加权稀疏阵列、大间距阵列栅瓣抑制和阵列天线的工程设计。第 1 章介绍除常规的直线阵列分析方法之外，增加了统计法确定不等间距阵列的方法，采用平方率相位分布展宽波束的方法，强调了利用直线阵列因子的根在谢昆诺夫单位圆上的分布来分析和综合阵列的方法。第 2 章除介绍直线阵列的一些主流综合方法之外，增加了 Villeneuve \bar{n} 综合方法，并介绍了工程设计中的余量设计思想，对泰勒综合方法根据其副瓣电平确定了其最小单元数，对伍德沃德-劳森综合法说明了不仅可以综合平顶方向图，而且可以综合超余割平方方向图。在前两章中得到了均匀阵列、切比雪夫阵列、泰勒阵列和贝利斯阵列不出现栅瓣的最大单元间距。第 3 章介绍平面阵列的分析，不仅涉及矩形栅格，还讨论了三角形栅格以及第 4 章应用的圆环形栅格，平面阵的边界不仅涉及矩形边界，还有圆形边界、椭圆形边界和八边形边界，并给出了如何建立平面阵边界的条件。采用复 T 平面给出了矩形栅格和三角形栅格平面阵的抑制栅瓣条件，给出了采用数值算法计算平面阵方向性系数的方法，给出了可分离型平面阵的综合设计方法，并给出了一种绘制平面阵三维方向图的方法。第 4 章介绍了不可分离型切比雪夫平面阵的综合、圆口径和椭圆口径泰勒平面阵的综合及圆口径贝利斯阵列的综合方法，对方形栅格圆口径泰勒平面阵讨论了其方向图不产生退化的最小单元数条件，对圆口径贝利斯综合公式中的 $\cos\varphi$ ，说明了在给定坐标系下定义的方位差和俯仰差还可以表示成 $\sin\varphi$ ，并说明了圆口径贝利斯离散阵列中各单元的方向余弦或正弦的表示在综合中的决定性作用。第 5 章增加了其他教材中没有的赋形波束优化综合方法，分别介绍了变尺度算法和 Orchard-Elliott 法，赋形波束是阵列天线中的一个十分重要的应用。第 6 章介绍相控阵天线原理，阵列天线理论的发展得益于相控阵雷达应用的发展，其内容是阵列天线理论与实际相结合的标志，内容需要涉及实际的阵列单元天线，实际单元天线组成的阵列必须考虑单元天线之间的互耦，讨论了小阵设计方法，对有源单元方向图进行了严格的推导，为大型相控阵天线的设计打下了基础。第 7 章介绍密度加权稀疏阵列，讨论了密度加权阵列的特点，

内容涉及独立采样法、相关采样法和幅度量化稀疏方法，相关采样法采用从中间向四周环绕相关的方法可以得到与样本满阵辐射特性十分接近的结果，并讨论了各种稀疏方法的结果随稀疏系数变化的影响。第8章介绍大间距阵列栅瓣抑制，其内容是相控阵有限扫描技术中采用的一种大间距阵列，也是近年来国内在阵列天线中研究的一个热点，本章重点是采用优化方法综合子阵级非周期结构阵列，使最小单元间距为大于一个波长的阵列栅瓣得到了抑制，并阐述了这种阵列结合高效单元天线，栅瓣的抑制可得到更好的效果。第9章介绍阵列天线的工程设计，包括实际阵列天线的设计思路、方法和步骤，具体介绍了询问机天线的设计，以及矩形波导窄边缝隙行波线阵天线的设计和微波着陆系统中方位台平面阵的设计，这个平面阵的俯仰面要实现超余割平方方向图，方位面要实现相控扫描，这几个阵列天线都给出了仿真结果和实测结果。

在写作风格上，本书以容易理解和掌握为宗旨，内容阐述深入浅出、循序渐进、通俗易懂；在表现方式上，尽量做到图文并茂，书中例举的平面阵列天线都附有表现力极强的三维方向图，读者可以更容易和更直观地理解阵列天线的辐射特性。对书中介绍的每一个方法和实例作者都编写了程序，对重要结果和结论进行了必要的验证，以保证其正确性。为了使读者更容易掌握所介绍的内容，对工程上常用且重要的综合方法都给出了综合设计步骤，有助于读者迅速有效地掌握阵列天线的基本概念和设计方法，使具有基本编程能力的读者容易进行阵列天线综合设计。

本书是按学生已经学完“电磁场理论”、“微波技术基础”、“天线原理与设计”以及相关数学课程的情况编写的，它既可以作为高等院校电子信息类专业本科高年级或研究生的教学用书，也可以作为工程技术人员的参考书。

本书得到了电子科技大学2014年新编特色教材建设项目的支持，并得到了参与该项目评审的专家、教授的支持和推荐，在此表示感谢。

编者实验室的研究生龚树军为本书第5章的 Orchard-Elliott 法编写了程序，刘华涛参与了本书部分插图的绘制和部分数据的验证工作，研究生周增广、郑贵等参与了本书前期的勘误和校对工作，冯梅老师参与了第二次勘误和校对工作，在此表示感谢，并对电子工程学院领导和部分老师的支持和鼓励表示感谢。

零八一电子集团科技公司领导及天线室的全体同仁对第6章的编写工作给予了极大的关心和帮助，赵玉国副主任、许小玲副主任、陈斌高工、王欣高工和汪波高工等提供了天线测量、小阵测试法及天线单元方面的文字资料和实验数据，并对稿件进行了认真细致的审查和校对，这里一并致谢。

本书由王建担任主编并负责编写第1章至第5章和第8章，郑一农负责编写第6章，何子远负责编写第7章，王建与冯梅合写第9章。最后的统稿工作由王建负责。

编者为确保本书的质量和内容的准确做出了努力，但由于水平有限，书中难免存在疏漏、差错和不足之处，殷切希望读者批评指正。

编 者

目 录

引言	1
第 1 章 直线阵列的分析	3
1.1 电流源的辐射场	3
1.2 直线阵列	4
1.2.1 并排振子直线阵	5
1.2.2 共轴振子直线阵	6
1.2.3 直线阵阵因子的简单导出方法	7
1.3 均匀直线阵的分析	8
1.3.1 主瓣最大值及最大指向	8
1.3.2 侧射阵、端射阵与扫描阵	8
1.3.3 可见区与非可见区	9
1.3.4 栅瓣及不出现栅瓣的条件	9
1.3.5 均匀侧射阵、扫描阵及端射阵的方向图	10
1.3.6 零点位置	11
1.3.7 主瓣零点宽度(BW) ₀	12
1.3.8 主瓣宽度(BW) _h	12
1.3.9 副瓣位置和副瓣电平	14
1.3.10 方向性系数 D	15
1.3.11 均匀直线阵方向性系数的另一种计算方法	16
1.3.12 相关问题的补充	18
1.4 强方向性端射阵	20
1.4.1 汉森-伍德亚德条件	21
1.4.2 强方向性端射阵的方向性系数	22
1.4.3 强方向性端射阵的其他参数	23
1.5 用 Z 变换法分析阵列	24
1.5.1 Z 变换与阵因子函数	25
1.5.2 Z 变换法分析阵列	27
1.6 谢昆诺夫单位圆辅助分析阵列	36
1.6.1 谢昆诺夫单位圆	36
1.6.2 均匀侧射阵的分析	38
1.6.3 低副瓣阵列	39
1.6.4 赋形波束阵列	41
1.7 不均匀阵列的分析	43
1.7.1 不等间距阵列	43
1.7.2 不均匀相位递变阵列	48

1.8	单脉冲阵列	55
1.8.1	和、差方向图阵因子	57
1.8.2	和、差方向性系数	58
1.8.3	差方向图主瓣和副瓣最大值位置	58
1.8.4	单脉冲雷达天馈系统简图	59
1.8.5	实例分析	59
第2章 直线阵列的综合		62
2.1	道尔夫-切比雪夫综合法	62
2.1.1	用单位圆说明实现低副瓣阵列的概念	62
2.1.2	切比雪夫多项式	63
2.1.3	阵因子多项式	65
2.1.4	切比雪夫阵列的设计	66
2.1.5	单元间距的改变对切比雪夫阵列方向图的影响	68
2.1.6	切比雪夫阵列激励幅度分布的通用综合公式	69
2.1.7	副瓣电平对切比雪夫阵激励幅度、锥削效率和方向图的影响	70
2.1.8	切比雪夫阵列的波束宽度和方向性系数	72
2.1.9	利用切比雪夫函数的根来综合阵列	75
2.2	功率方向图和激励系数	77
2.2.1	功率方向图函数及其 y 多项式展开表示	77
2.2.2	由方向图零点展开功率方向图函数及阵列函数	78
2.2.3	用 y 多项式功率方向图函数表示的方向性系数	79
2.2.4	实例及分析	80
2.2.5	用功率方向图的 y 多项式综合等副瓣阵列	83
2.2.6	综合结果参数之间的几个关系式	86
2.2.7	无副瓣阵列	87
2.3	傅里叶变换法	89
2.3.1	连续线源的综合	90
2.3.2	离散线阵的综合	92
2.4	伍德沃德-劳森抽样法	93
2.4.1	连续线源的综合	93
2.4.2	离散线阵的综合	96
2.5	泰勒综合法	101
2.5.1	线源的等副瓣理想空间因子	101
2.5.2	泰勒空间因子	104
2.5.3	线源的泰勒分布	107
2.5.4	泰勒阵列方向图的主瓣宽度和不出现栅瓣的最大间距	109
2.5.5	泰勒阵列的主要参数	111
2.5.6	泰勒综合法的步骤	111
2.5.7	副瓣电平对泰勒阵列激励幅度分布、锥削效率和方向图的影响	112

2.5.8	单元间距的改变对泰勒阵列方向图的影响	114
2.5.9	泰勒阵列的设计准则	115
2.5.10	泰勒综合法设计实例	116
2.5.11	泰勒阵列和切比雪夫阵列的比较	118
2.6	变形泰勒方向图的综合	120
2.6.1	变形泰勒空间因子	120
2.6.2	能产生变形泰勒方向图的连续线源电流分布	121
2.7	差方向图的贝利斯综合	123
2.7.1	贝利斯差方向图函数	124
2.7.2	线源的贝利斯分布	126
2.7.3	线源贝利斯分布的离散	127
2.7.4	贝利斯阵列的阵因子	128
2.7.5	贝利斯阵列差方向图的主瓣零点宽度及不出现栅瓣的最大间距	130
2.7.6	单元间距 d 的改变对贝利斯阵列方向图的影响	130
2.7.7	不同副瓣电平的贝利斯阵列激励幅度和方向图	131
2.8	Villeneuve \bar{n} 阵列综合法	133
2.8.1	用方向图零点表示切比雪夫阵列的阵因子	133
2.8.2	Villeneuve 方向图函数的构造	134
2.8.3	离散直线阵奇数阵列的综合公式	135
2.8.4	离散直线阵偶数阵列的综合公式	136
2.8.5	采用 Villeneuve \bar{n} 阵列综合实例	137
2.9	同时实现和、差方向图的直线阵列	139
2.9.1	采用一种对称激励分布的单脉冲阵列	139
2.9.2	同时采用两种激励分布的单脉冲阵列	139
第 3 章	平面阵列的分析	142
3.1	平面阵列的基本形式	142
3.1.1	常规平面阵形式	142
3.1.2	非常规平面阵形式	143
3.2	矩形栅格矩形平面阵列的阵因子	143
3.2.1	平面阵坐标及参数	144
3.2.2	阵因子方向图函数	144
3.2.3	平面阵波束指向	145
3.3	带反射板的对称振子平面阵	147
3.3.1	对称振子平面阵结构及坐标系	147
3.3.2	平面阵中第 mn 个单元及其镜像的辐射场	148
3.3.3	平面阵的总辐射场	148
3.3.4	E 面和 H 面方向图函数	149
3.3.5	对称振子均匀平面阵	150
3.4	平面阵的栅瓣及其抑制条件	151

3.4.1	复 T 平面	151
3.4.2	主瓣和栅瓣在复 T 平面中的位置关系	152
3.4.3	抑制栅瓣在实空间出现的条件	153
3.5	平面阵波束宽度和方向性系数	154
3.5.1	3dB 轮廓线方程	154
3.5.2	半功率波瓣宽度	157
3.5.3	平面阵方向性系数 D	159
3.6	平面阵的和、差方向图	161
3.6.1	从左到右顺序排列单元的情况	162
3.6.2	以阵列中心点为对称排列单元的情况	162
3.7	可分离型矩形栅格矩形平面阵的分析与设计实例	163
3.7.1	平面阵的综合设计	163
3.7.2	平面阵的三维方向图绘制	166
3.7.3	几个典型的可分离型矩形平面阵的分析	167
3.8	三角形栅格平面阵	169
3.8.1	三角形栅格矩形边界平面阵的阵因子	170
3.8.2	三角形栅格矩形平面阵的栅瓣及抑制	171
3.8.3	三角形栅格矩形平面阵的分析	173
3.9	几种典型边界平面阵的分析	176
3.9.1	阵列天线普遍适用的分析表达式	176
3.9.2	适合于分析特定边界平面阵的阵因子	177
3.9.3	圆形、椭圆形和八边形边界平面阵的分析实例	178
3.10	圆环阵列的分析	180
3.10.1	圆环阵阵因子	180
3.10.2	圆环阵的方向性系数	184
3.10.3	考虑单元方向图的圆环阵	186
第 4 章 平面阵列的综合		190
4.1	各剖面均为等副瓣的切比雪夫平面阵综合	190
4.1.1	阵因子	191
4.1.2	综合方法	192
4.1.3	主瓣宽度和方向性系数	193
4.1.4	实例	193
4.2	圆口径泰勒综合	195
4.2.1	圆口径泰勒空间因子	195
4.2.2	圆口径泰勒分布	197
4.2.3	圆口径泰勒分布的口径效率 ν	198
4.2.4	圆口径泰勒平面阵	201
4.3	椭圆口径泰勒综合	207
4.3.1	把椭圆转化为圆的坐标变换	207

4.3.2 椭圆口径综合实例	207
4.4 圆口径贝利斯综合	208
4.4.1 圆口径贝利斯空间因子	208
4.4.2 圆口径贝利斯分布	211
4.4.3 圆口径贝利斯平面阵	212
4.5 圆口径平面阵列和、差方向图的同时实现	216
第5章 阵列天线的优化综合	218
5.1 直线阵方向性系数的最优化	218
5.1.1 直线阵方向图函数的矩阵表示	218
5.1.2 方向性系数 D 的矩阵表示	219
5.1.3 方向性系数 D 的最优化方法	220
5.1.4 直线侧射阵方向性系数的最优化	220
5.1.5 直线端射阵方向性系数的最优化	222
5.2 圆环阵方向性系数的最优化	223
5.2.1 圆环阵侧射方向性系数的最优化	224
5.2.2 圆环阵端射方向性系数的最优化	225
5.2.3 短偶极子为圆环阵单元的方向性系数的最优化	226
5.3 赋形方向图的优化综合——变尺度算法	227
5.3.1 赋形波束的优化综合原理	228
5.3.2 赋形波束的优化综合实例	232
5.4 赋形方向图的优化综合——Orchard-Elliott 法	240
5.4.1 用复根表示的直线阵阵因子功率方向图函数	240
5.4.2 综合方法理论	241
5.4.3 用多项式函数展开来表示期望的赋形波束函数 $F_0(u)$	245
5.4.4 方法的改进	246
5.4.5 实例	246
5.4.6 赋形方向图的变尺算法与 Orchard-Elliott 方法的比较	255
第6章 相控阵天线原理	256
6.1 相控阵扫描原理	257
6.1.1 一维相控扫描阵列	258
6.1.2 二维相控扫描阵列	262
6.2 阵列天线单元互耦及分析方法	264
6.2.1 阻抗法	265
6.2.2 散射法	266
6.2.3 有源单元方向图	267
6.2.4 小阵分析法	274
6.3 相控阵的辐射单元	279
6.3.1 电流(线)天线单元	280
6.3.2 口径天线单元	282

6.3.3 微带贴片天线单元	284
6.4 相控阵的馈电方式	284
6.4.1 强制馈电方式	284
6.4.2 空间馈电方式	285
6.5 相控阵天线近场测量	287
6.5.1 平面近场测试系统简介	287
6.5.2 近场测量精度	289
6.5.3 相控阵天线近场测量方法	290
第7章 密度加权稀疏阵列	292
7.1 密度加权阵列特点	292
7.2 独立采样概率密度稀疏法	294
7.3 相关采样概率密度稀疏法	297
7.4 多阶密度加权法	300
7.4.1 幅度量化方法一	300
7.4.2 幅度量化方法二	302
7.5 密度加权阵性能数值模拟分析	304
第8章 大间距阵列栅瓣抑制	310
8.1 概述	310
8.2 大间距阵列采用的高效单元	312
8.2.1 孤立的单元天线	312
8.2.2 小阵中的单元天线	313
8.3 子阵级非周期结构阵列的分析模型	316
8.3.1 阵列中某个单元的远区辐射场	317
8.3.2 阵列总辐射场	318
8.3.3 子阵级周期结构矩形阵的分析	319
8.4 子阵级非周期结构阵列栅瓣抑制的随机分布法	320
8.5 子阵级非周期结构阵列栅瓣抑制的优化方法	322
8.6 子阵级非周期结构八角阵列的栅瓣抑制	326
8.7 子阵级旋转变形八角阵	332
8.7.1 旋转角度的确定	333
8.7.2 子阵级随机旋转角度的非周期结构八角阵	334
8.7.3 子阵级定角度旋转的非周期结构八角阵	335
8.8 环栅阵的分析	337
8.8.1 典型的弧形环栅阵	337
8.8.2 子阵为梯形的环栅阵	339
8.9 结论	343
第9章 阵列天线的工程设计	344
9.1 询问机天线设计	345

9.1.1	某询问机天线的技术指标	345
9.1.2	阵列的理论分析与综合	345
9.1.3	阵列单元的选择与仿真设计	347
9.1.4	和差馈电网络的仿真设计	348
9.1.5	单元天线阵与和差馈电网络的整体仿真及天线实物实测结果	348
9.2	矩形波导窄边缝隙行波线阵天线设计	350
9.2.1	某 X 波段窄边缝隙行波线阵天线的技术指标	350
9.2.2	阵列设计	350
9.2.3	矩形波导窄边缝隙阵的交叉极化及其抑制	353
9.2.4	缝隙等效并联电导与其激励幅度的关系	355
9.2.5	输入驻波及其与单元间距的关系	357
9.2.6	矩形波导窄边缝隙阵各单元倾角及切割深度	358
9.2.7	矩形波导窄边缝隙阵天线建模仿真及实物测试结果	360
9.3	赋形波束阵列天线设计	362
9.3.1	方位台平面阵的技术指标	362
9.3.2	平面阵的分析与设计	363
参考文献		369

引 言

随着无线电技术的发展，移动通信、广播、电视、导航、遥控遥测、雷达等应用已经逐渐覆盖了现代国防以及人们日常生活的方方面面。天线或天线阵列作为无线通信系统的信号发射/接收终端发挥着不可替代的作用。在实际应用中，单一的天线通常有方向性不强，增益不高的缺点，天线阵的应用满足了特定的工作环境、工作任务或者提高工作性能的要求。

由于阵列天线易于实现窄波束、低副瓣、多波束和相控波束扫描，使得发现目标和跟踪目标的可靠性、稳定性和实时性等性能得以提高，原来的一些采用反射面机械扫描的天线有的也改用阵列天线来实现。现代无线电通信系统和雷达系统中愈来愈多地采用阵列天线。例如，民用移动通信系统中作为基站天线的平板阵列天线、航海和航空管制的雷达天线、气象雷达天线、地球资源探测雷达天线、军用的远程警戒雷达天线、预警机载雷达天线、火控雷达天线、导弹制导及反导系统雷达天线等。

虽然阵列天线在二战时期就已出现，而且阵列天线的理论体系在上世纪六、七十年代就已形成，但是作为阵列天线最具代表性应用的相控阵雷达随着各项理论和技术的发展而不断发展，出现了有源相控阵、数字波束形成和自适应阵列、低副瓣和超低副瓣阵列等，使得阵列天线在理论和应用方面也在不断发展。为顺应现代无线电技术的发展，有必要学习和研究阵列天线。

天线的性能直接影响到无线电设备的使用，而现代无线电设备越来越多地采用阵列天线。阵列天线是根据电磁波在空间相互干涉的原理，把具有相同结构、相同尺寸的某种基本单元天线按一定规律排列在一起组成的。如果按直线排列，就构成直线阵；如果排列在一个平面内，就为平面阵。平面阵又分矩形平面阵、圆形平面阵等；还可以排列在飞行体等曲面表面以形成共形阵。

在无线电系统中若需要天线将能量集中于一个非常狭窄的空间辐射出去，以增强方向性和提高增益，或方位面波束很宽甚至全向但俯仰面波束很窄，采用阵列天线是一个很好的选择。

在雷达应用中，其天线既需要有尖锐的辐射波束又希望有较宽的覆盖范围，则需要波束扫描，若采用机械扫描则反应时间较慢，必须采用电扫描，若为相位控制波束扫描，就需要采用相控阵天线，若为频率控制波束扫描，则需要采用频扫阵列天线。

一些雷达设备和微波着陆系统等，虽然要求其天线的辐射能量集中程度不是很高，但是俯仰面需要形成赋形波束，方位面需要波束扫描，必须采用阵列天线。

在多功能雷达系统中，既需要在俯仰面进行波束扫描，又需要改变相位展宽波束，还需要仅改变相位进行波束赋形甚至形成多波束等，实现这些功能的天线系统只有相控阵天线才能完成。

在微波毫米波段，如果要使天线副瓣电平低、频带宽等，则可采用波导窄边缝隙阵，如果要使天线厚度薄、损耗低、效率高、增益高，则可采用平板缝隙阵。

随着各项技术的发展，天线馈电网络与单元天线进行一体化设计成为可能，高集成度的T/R组件的成本越来越低，使得阵列天线越来越被广泛的采用，阵列天线实现低副瓣和极低副瓣越来越容易，功能越来越强。

综上所述，采用阵列天线的理由大致有如下几点：

- 容易实现极窄波束，以提高天线的方向性和增益；
- 易于实现赋形波束和多波束；
- 易于实现波束的相控扫描和频率扫描；
- 易于实现低副瓣电平的方向图。

对上面第一点，可采用大型阵列天线来实现；对后三点，可采用阵列天线的口径幅度分布和相位分布来控制，或在阵列中划分子阵，并考虑馈电网络与辐射单元天线的一体化设计，甚至采用

含 T/R 组件的有源相控阵。

阵列天线理论包括两方面内容，一是阵列天线的分析，二是阵列天线的综合，在实际设计阵列天线时，必须同时进行这两个方面的工作。

■ 阵列天线的分析

阵列天线的分析是在已知如下四个参数的情况下分析确定阵列天线的辐射特性，包括阵列天线的方向图、半功率波瓣宽度、方向性系数、增益和效率、副瓣电平等。

- (1) 单元总数。(如直线阵的 N ，平面阵的 $M \times N$)
- (2) 单元在空间的分布。(如直线阵的 d ，平面阵的 d_x 、 d_y)
- (3) 各单元的激励幅度分布。(如直线阵的 I_n ，平面阵的 I_{mn} 或 I_{xm} 、 I_{yn})
- (4) 各单元的激励相位分布。(如直线阵的 α_n ，平面阵的 α_{mn} 或 α_{xm} 、 α_{yn})

■ 阵列天线的综合

阵列天线的综合则是其分析的逆问题，即在给定辐射特性的情况下综合出阵列天线的如上四个参数，使阵列的某些辐射特性满足给定的要求，或使阵列的方向图尽可能地逼近预定的方向图。

第 1 章 直线阵列的分析

为了增强天线的方向性，提高天线的方向性系数或增益，或者为了得到所需的辐射特性，我们可以采用天线阵。天线阵是由多个天线单元按照一定方式排列在一起而组成的。组成阵列天线的独立单元称为天线单元、单元天线或阵元。

直线阵列的分析方法是平面阵列分析的基础。对于可分离型的矩形栅格矩形边界的平面阵列，可以看作是一些直线阵列按行或按列排列在一起构成的。导出直线阵列阵因子的方法大致有两种，一种是求解面电流源的辐射场，然后根据阵列为离散源组合在一起的特点对面电流源进行抽样，就可得到直线阵列的阵因子；另一种是先确定阵列中某个单元天线的远区辐射场表达式，然后考虑波程差，把阵列中所有单元天线的辐射场叠加起来，求得阵列的总辐射场，从而求得阵因子。

1.1 电流源的辐射场

假设在 xz 平面上有一个面积为 S 的面电流源，其面电流密度为 $\mathbf{J}(\mathbf{r}') = \hat{\mathbf{z}} J_z(x', z')$ ，如图 1.1-1 所示，求远区辐射场。

这是一种分析阵列天线十分有用的模型。阵列天线中各单元天线是离散排布的，各单元的激励电流是离散分布的，可以把阵列中各单元的电流值视为连续电流分布的抽样值。

求面电流源辐射远场的方法步骤如下。

1. 求矢量位 \mathbf{A}

面电流源在空间某点产生的矢量位为

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dS' \quad (1.1.1)$$

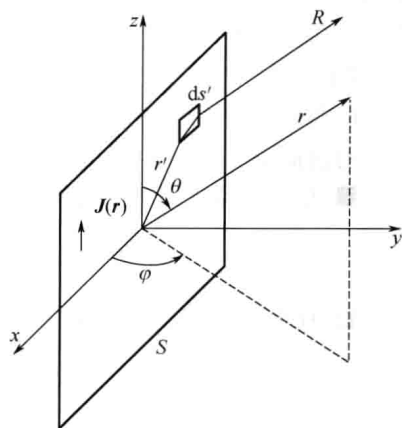


图 1.1-1 面电流源及坐标系

式中， $k = 2\pi/\lambda$ ，对于远区， $r, R \gg \lambda$ ，可做如下近似：

对幅度： $1/R \approx 1/r$

对相位： $e^{-jkR} = e^{-jkr} e^{-jk(R-r)}$

且由 $\hat{\mathbf{r}} = \hat{\mathbf{x}} \sin \theta \cos \varphi + \hat{\mathbf{y}} \sin \theta \sin \varphi + \hat{\mathbf{z}} \cos \theta$

$$\mathbf{r}' = x'\hat{\mathbf{x}} + z'\hat{\mathbf{z}}$$

$$\text{可得其波程差: } R - r = -\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}' = -(x' \sin \theta \cos \varphi + z' \cos \theta) \quad (1.1.2)$$

则式 (1.1.1) 可写作：

$$\mathbf{A} = \hat{\mathbf{z}} \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \iint_S J_z(x', z') e^{jk(x' \sin \theta \cos \varphi + z' \cos \theta)} dx' dz' = \hat{\mathbf{z}} A_z \quad (1.1.3)$$

2. 把直角坐标系下的矢量各分量转化为球坐标系下的矢量各分量

在球坐标系中， \mathbf{A} 的表示为 $\mathbf{A} = \hat{\mathbf{r}} A_r + \hat{\boldsymbol{\theta}} A_\theta + \hat{\boldsymbol{\phi}} A_\phi$ ，利用球坐标中矢量各分量与直角坐标系中矢量各分量的关系矩阵：

$$\begin{bmatrix} A_r \\ A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi & \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \\ \cos \theta \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi & -\sin \theta \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \quad (1.1.4)$$

因 $A_x = A_y = 0$ ，可得

$$\begin{cases} A_r = A_z \cos \theta \\ A_\theta = -A_z \sin \theta \\ A_\varphi = 0 \end{cases} \quad (1.1.5)$$

3. 由远场公式 $E = -j\omega A$ 求远区电场

$$\begin{aligned} E_\theta &= -j\omega A_\theta = j\omega A_z \sin \theta \\ &= j \frac{\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \iint_S J_z(x', z') e^{jk(x' \sin \theta \cos \varphi + z' \cos \theta)} dx' dz' \\ &= j \frac{\eta e^{-jkr}}{4\pi r} F(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (1.1.6)$$

式中使用了关系 $\omega\mu = k\eta$ ，且 $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ 为传播媒质中的波阻抗，方向图函数为

$$F(\theta, \varphi) = k \sin \theta \iint_S J_z(x', z') e^{jk(x' \sin \theta \cos \varphi + z' \cos \theta)} dx' dz' \quad (1.1.7)$$

4. E 面和 H 面方向图函数

天线方向图一般是三维空间的曲面图形，但工程上为了方便，常采用通过最大辐射方向的两个正交平面上的剖面图来描述天线的方向图。这两个相互正交的平面称为主面，对于线极化天线来说通常取为 E 面和 H 面。

E 面：是指通过最大辐射方向并平行于电场矢量的平面；

H 面：是指通过最大辐射方向并垂直于电场矢量的平面。

对前面图 1.1-1 所示的面电流源天线，其 E 面和 H 面方向图分别为：

■ E 面（即 yz 平面， $\varphi = \pi/2$ ）

$$F_E(\theta) = k \sin \theta \iint_S J_z(x', z') e^{jkz' \cos \theta} dx' dz' \quad (1.1.8)$$

■ H 面（即 xy 平面， $\theta = \pi/2$ ）

$$F_H(\varphi) = k \iint_S J_z(x', z') e^{jkx' \cos \varphi} dx' dz' \quad (1.1.9)$$

1.2 直线阵列

为简单起见，这里主要讨论由对称振子组成的直线阵。对称振子组成的直线阵主要有两种排列形式：一种是并排振子直线阵，如图 1.2-1 所示；另一种是共轴振子直线阵，如图 1.2-2 所示。

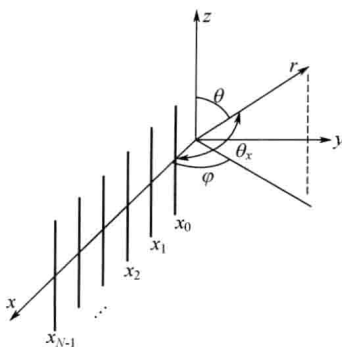


图 1.2-1 并排振子直线阵

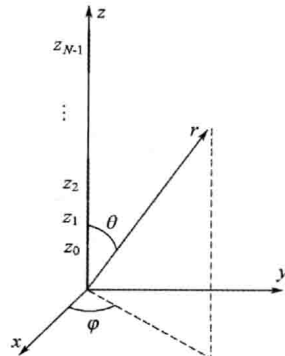


图 1.2-2 共轴振子直线阵

1.2.1 并排振子直线阵

设阵列中有 N 个相同的对称振子单元天线，长度为 $2L$ ，各振子平行排列在 x 轴上，位置分别为 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}$ ，阵列天线的电流分布可看作是图 1.1-1 连续电流密度的抽样。即

$$J_z(x', z') = \sum_{n=0}^{N-1} \dot{I}_n g(z') \delta(x' - x_n) \quad (1.2.1)$$

式中， $\dot{I}_n = I_n e^{jn\alpha}$ ， I_n 表示单元馈电振幅， α 表示相邻单元间的馈电相位差，或称均匀递变相位； $\delta(x' - x_n)$ 为 delta 函数； $g(z')$ 表示振子上电流沿 z 轴变化的函数，其近似为

$$g(z') = \sin k(L - |z'|), \quad (1.2.2)$$

把式 (1.2.1) 代入式 (1.1.7)，并利用关系 $\int f(x) \delta(x - x_n) dx = f(x_n)$ ，得

$$\begin{aligned} F(\theta, \varphi) &= k \sin \theta \sum_{n=0}^{N-1} \dot{I}_n e^{jkx_n \sin \theta \cos \varphi} \int_L g(z') e^{jkz' \cos \theta} dz' \\ &= k f_0(\theta) S(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

式中， $f_0(\theta)$ 为对称振子单元方向图函数，并由式 (1.2.2) 可得

$$f_0(\theta) = \sin \theta \int_L g(z') e^{jkz' \cos \theta} dz' = \frac{2}{k} \frac{\cos(kL \cos \theta) - \cos(kL)}{\sin \theta} \quad (1.2.4)$$

阵因子方向图函数为

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} \dot{I}_n e^{jkx_n \sin \theta \cos \varphi} = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{j(kx_n \cos \theta_x + n\alpha)} \quad (1.2.5)$$

式中， $\cos \theta_x = \sin \theta \cos \varphi$ ， θ_x 为 x 轴与射线之间的夹角，见图 1.2-1。

式 (1.2.3) 表示了阵列天线的方向图相乘原理，即阵列天线的总场方向图为单元方向图与阵因子方向图的乘积。由式 (1.2.5) 可见，阵因子与单元数 N 、单元的空间分布 x_n 、激励幅度 I_n 和激励相位 α 有关。一般情况下，单元方向图的波束宽度很宽，在单元数较多的情况下可不计单元方向图的影响。因此，研究阵因子便能获得阵列的辐射特性。

对于均匀直线阵，单元为等间距 d 排列，激励幅度相同 $I_n = I_0$ ，激励相位按 α 均匀递变（递增或递减）。设无论是奇数还是偶数单元的阵列，其坐标原点均设在阵列中点，如图 1.2-3 所示。这两种情况均有如下关系：

$$x_n = \left(n + 1 - \frac{N+1}{2} \right) d, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1.2.6)$$



图 1.2-3 阵列中心点为坐标原点

代入式 (1.2.5) 可得均匀直线阵的阵因子为

$$S(\theta, \varphi) = I_0 e^{jk \left(1 - \frac{N+1}{2} \right) d \cos \theta_x} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn\alpha} \quad (1.2.7)$$

式中，
$$u = kd \cos \theta_x + \alpha \quad (1.2.8)$$