



国防特色教材·电子科学与技术

阵列天线分析与综合

ZHENLIE TIANXIAN FENXI YU ZONGHE

○ 薛正辉 李伟明 任 武 编著 ○

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·电子科学与技术

阵列天线分析与综合

薛正辉 李伟明 任 武 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书是“十一五”国防特色学科专业教材,其主要内容包括阵列天线的基本概念、直线阵列分析与综合的基本理论与方法、平面阵列分析与综合的基本理论与方法以及阵列天线的最优化设计等。本书可以看做是阵列天线工程应用的基础理论部分,主要侧重于介绍阵列天线分析与综合设计中的数学方法及实施手段。

本书是为电子科学与技术、信息与通信工程等学科领域的工科研究生或高年级本科生编写的教材,适合于信息工程、雷达、通信、电子对抗和遥感遥测等专业,供“微波天线”、“阵列天线分析与综合”和“阵列天线”课程教学使用,也可供从事阵列天线研发的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

阵列天线分析与综合 / 薛正辉,李伟明,任武编著

—北京:北京航空航天大学出版社,2011.2

ISBN 978-7-5124-0269-0

I. ①阵… II. ①薛… ②李… ③任… III. ①天线阵
—高等学校—教材 IV. ①TN820.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 232843 号

版权所有,侵权必究。

阵列天线分析与综合

薛正辉 李伟明 任武 编著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:26.25 字数:588 千字

2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-0269-0 定价:49.50 元

前 言

本书可以看做是阵列天线工程应用的基础理论部分,其主要内容是介绍阵列天线的基本概念、直线阵列分析与综合的基本理论与方法、平面阵列分析与综合的基本理论与方法以及阵列天线的最优化设计等。全书内容分为4个部分,共7章。第一部分为阵列天线的理论基础,包括第1章:阵列天线的理论基础。第二部分以线阵为对象,介绍其分析与综合的基本方法、基本过程和基本结论,包括第2章:直线阵列及其分析;第3章:直线阵列的综合——副瓣电平控制;第4章:直线阵列的综合——方向图逼近;第5章:直线阵列的综合——微扰法的应用。第三部分针对面阵,介绍其类型、分析与综合的基本问题,包括第6章:平面阵列及其分析与综合。第四部分讨论了阵列天线的最优化设计问题,实际上是阵列综合问题的延伸,主要针对线阵和面阵的方向性系数等辐射特性的优化,包括第7章:阵列天线的综合——方向性系数优化。各章后还附有习题可供选用。本书的参考学时为48~64学时。

在此基础上,阵列天线领域的内容还包括相控阵天线、频扫天线、多波束天线、MIMO天线、智能天线等,采用特殊单元形式的波导裂缝阵列天线、微带贴片阵列天线等,以及共形阵列天线、导体和介质表面上的阵列天线等特殊应用场合下的阵列天线等;还应该包括阵列天线的诊断和测试技术等方面的内容。编者希望能在不久的将来把这部分内容结集出版,作为本书的补充和延伸,使阵列天线的理论和实践统一起来。

根据编者多年来的授课经验,阵列天线这一课程所涉及的知识领域中数学工具的应用非常多,要求读者具备比较深入、广博和扎实的数理基础知识和完成必要的先修课程,如工科公共基础课程“数学分析”、“高等代数”、“复变函数与积分变换”、“数理方程与特殊函数”,工科电磁场与微波技术专业基础课程“电磁场理论”、“微波技术”、“微波天线”、“微波网络”等。考虑到工科研究生或高年级本科生的具体情况和对这一学科知识的需求,本书在编写中尽量简化了繁复的理论分析与数学推导过程,而通过大量的分析与综合实例,着重于对方法的基本原理、结论和应用过程的介绍;从表现方式上尽量应用了先进的绘图技术,使得阵列天线辐射的三维空间图形做到可视化;内容取舍上也贯彻了以介绍经典的、已经验证

和广泛应用的理论与方法为中心的原则。它既可以作为教科书,也可以供工程技术人员参考。

本书是在编者多年讲授“阵列天线分析与综合”课程所用讲稿的基础上整理、补充、完善而成的。在之前的讲稿和本书的编写过程中,编者主要是以前电子工业部统编教材《阵列天线分析与综合》的内容为基本框架和蓝本的,这一经典教材由电子科技大学出版社于1989年出版,由西安电子科技大学汪茂光教授、北京航空航天大学吕善伟教授和北京理工大学刘瑞祥教授联合编写。该书是他们集合多年教学和科研实践的结晶之作,理论基础扎实、内容丰富全面、逻辑清晰、准确精炼、例证丰富,具有很高的水平,经过了多年教学实践检验,有非常好的反响,在国内高校和工程技术的相关领域有着非常好的基础。这三位教授都是本学科卓有声誉和影响的前辈,他们治学严谨、成果丰硕,都曾执教“阵列天线分析与综合”课程多年,编者曾有幸师从于他们中的两位。正是基于此,编者选择以这本教材为基础进行本书的编写工作,希望在20年后能使这一优秀教材得以延续和发扬光大。在重编过程中,编者注意了名词、符号和版式的统一,修正了文字和公式的错漏,考虑了与天线等前修课程的衔接,根据技术发展补充了部分内容和实例,借助近年来比较先进的绘图技术补充和丰富了天线辐射方向图等三维图形。

此外,编者还借鉴和参考了国外其他经典教材和书籍,这些书籍和教材的作者都是国际知名的、顶级的专家学者,其专著历经几十年而成为经典,包括 M. T. Ma 教授著,出版于1974年的 *Theory and Application of Antenna Arrays*; Robert S. Elliott 教授著,1981年首版、2003年再版的 *Antenna Theory and Design*; Constantine A. Balanis 教授著,2005年第三版的 *Antenna Theory - Analysis and Design*; Thomas A. Milligan 博士著,2005年再版的 *Modern Antenna Design* 等。在此,编者对他们表示由衷的感谢,正是站在了这些前辈的肩膀上,我们才得以把视界放远,才能不断进步。

本书选题的确定和列入出版规划得到了“十一五”国防特色教材计划的支持。在编写过程中,得到了北京理工大学信息与电子学院、微波技术研究所领导和老师的热情指导、积极支持和帮助,采纳了他们的许多中肯建议。北京航空航天大学出版社和“十一五”国防特色教材办公室的有关领导和人员也为本书的编写和出版提供了支持和帮助。在此,编者一并表示感谢。

在本书的插图绘制工作中,得到了华中科技大学陈德智副教授的大力帮助,他为本书编制了绘制三维方向图的基本程序,并且指导编者进行了三维方向图插

图作图的具体工作。编者实验室的硕士研究生张乔杉帮助完成了微扰方法的例程编制工作,程文昕帮助完成了阵列天线方向性系数优化部分的文字录入与例程编制工作,齐文超帮助完成了书中若干结论曲线数据的提取工作,曹猛和张涛帮助完成了本书部分习题的文字录入工作。多年来许多研究生在学习这门课程的过程中,从学习者的角度也对这本教材的编写提出了许多意见和建议。在此,编者也要对这些同事和学生表示感谢。

本书由薛正辉担任主编并负责编写第1章至第5章,李伟明编写了第6章,任武编写了第7章,最后由薛正辉进行了统稿。

本书承蒙北京航空航天大学吕善伟教授和北京理工大学刘瑞祥教授审阅并校订了全部内容,两位教授都提出了非常宝贵的建议,甚至逐字逐句给出了修改意见,谨此表示衷心感谢。

由于编者的水平有限,编写时间较紧,书中难免还存在错漏和不足之处,殷切希望广大读者和各位同行、专家、学者批评指正。

编 者

2010年5月于北京理工大学

目 录

绪 论	1
0.1 阵列天线的基本概念	1
0.2 本书的主要内容和章节安排	2
第 1 章 阵列天线的理论基础	3
1.1 电磁波的干涉与叠加原理	3
1.2 方向图乘积定理与阵因子特性	7
1.2.1 阵列天线的辐射场与方向图乘积定理	7
1.2.2 阵因子特性	9
1.3 二元阵	12
1.3.1 半波长间距等幅同相二元阵	12
1.3.2 整波长间距等幅同相二元阵	14
1.3.3 半波长间距等幅反相二元阵	15
1.3.4 四分之一波长间距等幅相差 90° 二元阵	16
1.3.5 半波长间距不等幅同相二元阵	17
1.3.6 方向图乘积定理的应用	19
习题 1	22
第 2 章 直线阵列及其分析	24
2.1 线阵通用方向图函数及极坐标表示	24
2.2 Z 变换分析方法	28
2.2.1 Z 变换的定义和物理意义	28
2.2.2 Z 变换在阵列天线分析中的应用	29
2.3 谢昆诺夫单位圆分析方法	38
2.4 均匀线阵	43
2.4.1 均匀线阵的一般讨论	43
2.4.2 侧射阵	47
2.4.3 普通端射阵	50
2.4.4 增强方向性端射阵	54

2.4.5	均匀线阵总结	58
2.5	功率方向图	60
2.5.1	功率方向图的概念和特性	60
2.5.2	利用功率方向图进行阵列特性分析	62
2.6	非均匀线阵	65
2.6.1	不等幅激励线阵	65
2.6.2	不等间距线阵	73
2.6.3	不均匀相位递变阵列	78
2.7	扫描线阵	86
2.8	单脉冲线阵	90
	习题 2	95
第 3 章	直线阵列的综合——副瓣电平控制	102
3.1	直线阵列综合基础	103
3.1.1	降低副瓣电平的一般讨论	103
3.1.2	二项式阵	106
3.2	道尔夫-切比雪夫综合法	108
3.2.1	切比雪夫多项式	109
3.2.2	道尔夫-切比雪夫阵列函数	110
3.2.3	道尔夫-切比雪夫综合法	112
3.2.4	道尔夫-切比雪夫线阵的波瓣宽度与方向性系数	114
3.3	功率方向图综合法	117
3.3.1	功率方向图综合法的一般讨论	118
3.3.2	用功率方向图方法综合等副瓣阵列	120
3.4	小间距阵列的综合法	130
3.4.1	最佳小间距侧射阵列的综合	130
3.4.2	最佳小间距端射阵列的综合	136
3.4.3	超方向性阵列	148
3.5	泰勒综合法——单变量方法	151
3.5.1	连续线源的方向图函数	151
3.5.2	单变量泰勒线源分布的方向图函数	152
3.5.3	单变量泰勒线源分布综合法	154
3.6	泰勒综合法——切比雪夫误差方法	155
3.6.1	线源的等副瓣理想空间因子	157

3.6.2	泰勒方向图函数	160
3.6.3	泰勒综合法	163
3.6.4	副瓣结构可变的泰勒综合法	167
3.6.5	连续线源分布的离散化	171
3.7	差方向图的贝利斯综合法	172
3.7.1	线源差方向图的一般讨论	173
3.7.2	贝利斯综合法	174
	习题 3	178
第 4 章	直线阵列的综合——方向图逼近	185
4.1	傅里叶变换综合法	185
4.1.1	线源的方向图函数及其傅里叶变换综合	185
4.1.2	线阵的方向图函数及其傅里叶变换综合	188
4.2	伍德沃德-劳森抽样综合法	190
4.2.1	连续线源的伍德沃德-劳森抽样综合法	190
4.2.2	伍德沃德-劳森线阵	196
4.3	根匹配综合法	199
4.4	功率方向图逼近的基本问题	201
4.4.1	方向图逼近的任务描述	202
4.4.2	函数逼近理论	202
4.5	多项式内插综合法	203
4.5.1	多项式内插的基本原理	204
4.5.2	多项式内插在功率方向图逼近中的应用	206
4.6	三角函数内插综合法	212
4.6.1	三角内插法的基本原理	212
4.6.2	三角内插法在阵列综合中的应用	213
4.7	伯恩斯坦多项式逼近综合法	216
4.7.1	伯恩斯坦多项式逼近	217
4.7.2	伯恩斯坦多项式逼近在方向图逼近中的应用	218
4.8	反 Z 变换综合法	222
4.9	哈尔定理综合法	224
4.9.1	哈尔定理	224
4.9.2	哈尔定理在方向图逼近中的应用	225
	习题 4	232

第 5 章 直线阵列的综合——微扰法的应用	235
5.1 微扰法及其在阵列综合中的应用	235
5.1.1 间距微扰法	236
5.1.2 激励幅度微扰法	242
5.2 微扰法综合任意副瓣结构的泰勒方向图	245
5.3 微扰法综合任意副瓣结构的差方向图	251
5.4 微扰法在改善方向图退化方面的应用	253
5.4.1 任意副瓣结构泰勒和方向图的改善	254
5.4.2 任意副瓣结构贝利斯差方向图的改善	257
习题 5	259
第 6 章 平面阵列及其分析与综合	260
6.1 平面阵列分析的一般讨论	260
6.2 可分离分布矩形平面阵列及其分析	261
6.2.1 方向图函数	262
6.2.2 波束指向	265
6.2.3 波瓣宽度	267
6.2.4 方向性系数	272
6.2.5 单元的排列方式和阵面形状	273
6.3 面阵和方向图与差方向图	278
6.4 可分离分布矩形栅格面阵的综合	282
6.5 切比雪夫平面阵	285
6.5.1 切比雪夫平面阵综合	287
6.5.2 修正的平面切比雪夫分布	291
6.6 卷积法分析与综合面阵	293
6.7 圆环阵列及其分析	301
6.7.1 方向图函数	301
6.7.2 方向性系数	308
6.8 同心圆环阵列的综合	312
6.9 椭圆环阵列的分析与综合	317
6.10 圆口径泰勒分布	321
6.10.1 平面口径的方向图函数	321
6.10.2 均匀分布圆形口径的方向图函数	322

6.10.3	圆形口径泰勒分布的方向图函数及其综合	325
6.10.4	可变副瓣结构的泰勒分布圆形口径方向图函数及其综合	331
6.10.5	非圆对称的泰勒分布圆形口径方向图函数及其综合	333
6.11	圆口径泰勒分布面阵	339
6.11.1	矩形栅格	339
6.11.2	微扰法改善方向图退化	346
6.11.3	圆形栅格	351
6.12	圆口径贝利斯分布	360
6.12.1	形成差方向图的圆口径分布	360
6.12.2	贝利斯方向图函数	363
6.12.3	修正的贝利斯方向图函数	367
6.13	圆口径贝利斯分布面阵	367
6.14	椭圆口径面阵	371
6.15	离散阵列与连续口径天线性能比较	374
	习题 6	378
第 7 章	阵列天线的综合——方向性系数优化	382
7.1	阵列天线方向性系数优化的一般讨论	382
7.2	线阵方向性系数的最优化	383
7.2.1	厄尔米特二次型	383
7.2.2	方向性系数最优化的综合	384
7.3	差方向图的方向性系数最优化	390
7.4	圆环阵与椭圆环阵的方向性系数最优化	393
7.5	有约束的阵列天线性能指标的最优化	399
7.5.1	优化问题的数学模型	399
7.5.2	优化方法	401
	习题 7	405
	参考文献	406

绪 论

0.1 阵列天线的基本概念

天线是一种用于发射和接收电磁能量的设备。在许多场合,由单个天线(或称为单个辐射器)就可以很好地完成发射和接收电磁能量的任务,如常用的各种线天线、面天线、反射面天线等,其本身就可以独立工作。但这些天线形式一旦选定,其辐射特性便是相对固定的,如波瓣指向、波束宽度、增益等,这就造成在某些特殊应用场合,如雷达天线一般要求较强的方向性、较高的增益、很窄的波束宽度、波束可以实现电扫描及其他一些特殊指标,单个天线往往不能达到预定的要求,这时就需要多个天线联合起来工作,共同实现一个预定的指标,这种组合造就了阵列天线。

若干个天线(辐射器)按照一定的方式排列和激励,利用电磁波的干涉原理和叠加原理来产生特殊的辐射特性,这种多辐射器的结构就称为天线阵,构造成的阵列排列的多天线可以看做是一个独立的天线,称为阵列天线,构成阵列天线的单个辐射器称为单元。

阵列天线一般按照单元的排列方式进行分类。各单元中心沿直线排列的阵列天线为线阵,单元间距可以相等或不等;按照辐射能量集中的方向又可分为侧射阵及端射阵。若各单元中心排列在一个平面内,则称为平面阵。若平面阵所有单元按矩形栅格排列,则称为矩形阵;若所有单元中心位于同心圆环或椭圆环上,则称为圆阵。平面阵也可以有等间距及不等间距排列。还有一类称为共形阵,其单元的位置与某些非平面的表面(如飞行器的表面)共形。

阵列天线采用的单元形式很多,可以是简单的偶极子或环天线,可以是喇叭天线或微带贴片天线,甚至可以是复杂的抛物反射面天线,具体采用何种形式取决于工作频带、环境、制造成本及其他许多因素。虽然理论上组成天线阵列的各单元可以是不同形式的,但在大多数实际应用中,天线阵列的各单元不但形式相同、规格相同,而且其排列取向也相同,称之为相似元。一般而言,总是尽量简化单元的结构,而把主要注意力放在组阵方面,因此单元多数采用偶极子、波导开口、波导裂缝等简单天线。

由某种单元组成的天线阵中通常有 4 个参数是可变的,这 4 个参数是单元总数、各单元的空间位置分布、各单元的激励幅度及激励相位。若上述 4 个参数给定,根据这些参数确定阵列天线辐射特性,包括方向图、方向性系数、增益和阻抗等,则称为阵列天线的分析问题;反之,根据需求的辐射特性去确定上述 4 个参数的过程,则称为阵列天线的综合问题。这两个问题是阵列天线领域的核心问题,也是阵列天线工程应用必须解决的基础问题。

0.2 本书的主要内容和章节安排

根据本书的定位和主要功能,作为阵列天线工程应用的基础,书中全面介绍了阵列天线分析与综合的内容。全书从内容上分为4个部分,共7章。

第一部分为阵列天线的理论基础,包括

- 第1章:阵列天线的理论基础。

第二部分以线阵为对象,介绍其分析与综合的基本方法、基本过程和基本结论,包括

- 第2章:直线阵列及其分析;
- 第3章:直线阵列的综合——副瓣电平控制;
- 第4章:直线阵列的综合——方向图逼近;
- 第5章:直线阵列的综合——微扰法的应用。

第三部分针对面阵,介绍其类型、分析与综合的基本问题,包括

- 第6章:平面阵列及其分析与综合。

第四部分讨论了阵列天线的最优化设计问题,实际上是阵列综合问题的延伸,主要针对线阵和面阵的方向性系数等辐射特性的优化,包括

- 第7章:阵列天线的综合——方向性系数优化。

本书主要是为配合研究生课程“阵列天线分析与综合”的开设而编写的。内容基本覆盖了近几十年来阵列天线分析与综合的经典理论与方法。由于数学工具的应用非常多,要求读者具备比较深入、广博和扎实的数理基础知识和完成必要的先修课程,如工科公共基础课程“数学分析”、“高等代数”、“复变函数与积分变换”、“数理方程与特殊函数”;工科电磁场与微波技术专业基础课程“电磁场理论”、“微波技术”、“微波天线”、“微波网络”等。考虑到工科研究生或高年级本科生的具体情况和对这一学科知识的需求,本书在编写中尽量简化了繁复的理论分析与数学推导过程,而通过大量的分析与综合实例,着重于对方法的基本原理、结论和应用过程的介绍;从表现方式上尽量应用了先进的绘图技术,使得阵列天线辐射的三维空间图形做到可视化;内容取舍上也贯彻了以介绍经典的、已经验证和广泛应用的理论与方法为中心的原则。

第 1 章 阵列天线的理论基础

本章主要介绍阵列天线得以构成的理论基础,主要包括电磁波的干涉与叠加原理、方向图乘积定理这两个重要原理。此外,作为线阵、平面阵和三维空间组阵的公共最小单位,由两个辐射单元组成的二元阵辐射特性的分析与讨论是阵列天线分析与综合的基础,从中可以看到上述两个重要原理最基本的体现和应用,因此在本书中也作为阵列天线的理论基础一并加以介绍。

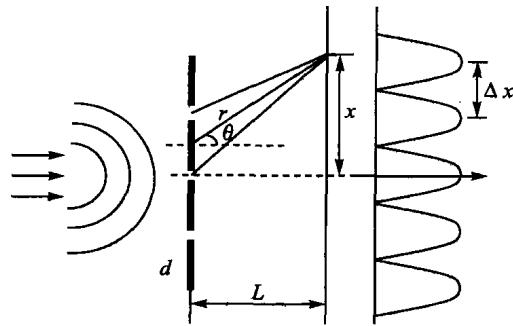
1.1 电磁波的干涉与叠加原理

阵列天线能够形成不同于一般单元天线的辐射特性,尤其是可以形成指向某部分空间的、比单元天线强得多的辐射,最根本的原因就是来自多个相干辐射单元的辐射电磁波在空间相互干涉并叠加,在某些空间区域加强,而在另一些空间区域减弱,从而使得不变的总辐射能量在空间重新分布。

波的干涉与叠加最初来源于光学领域。英国学者托马斯·杨(1773—1829)仔细观察了在两组水波交叠处发生的现象:“一组波的波峰与另一组波的波峰相重合,将形成一组波峰更高的波。如果一组波的波峰与另一组波的波谷相重合,那么波峰恰好填满波谷。”声波的叠加也如此,声波叠加会产生声音的加强和减弱、复合的声调和拍频。在此基础上,他于1801年在一篇报告中发展了惠更斯的光学理论,提出了著名的“干涉原理”,也称“波的叠加原理”,并在光学中首次引入了“干涉”的概念。在上述报告中,托马斯·杨所表述的干涉原理是:“同一束光的两个不同部分,以不同的路径要么完全一样地,要么在方向上十分接近地进入眼睛,在光线的路程差是某个长度的整数倍的地方,光就增强;而在干涉区域的中间部分,光将最强。对于不同颜色的光束来说,这个长度是不同的。”同时,他指出了产生干涉现象的条件,并首次完成了著名的双缝干涉实验和其他一些干涉实验,总结出:为了显示光的干涉,必须先使从同一光源出来的光分成两束,经由不同的途径,然后重新叠加在一起,即可观察到干涉现象。著名的干涉缝实验如图 1.1 所示。

由于光本身的波动性,光波与电磁波本质上是相似的,因此可以把这一最初在光学领域提出的基本原理推广到电磁波领域。

我们知道,天线在空间的辐射是天线源电流产生的,若空间中存在满足相干关系的多个电流(如一个电流分出的多个部分,施加在不同的天线单元上),则多个电流的辐射电磁场在空间中将发生叠加,形成干涉现象,造成某些空间区域场同相叠加,场加强;某些空间区域场反相叠加,场削弱;而另外一些区域场的叠加介于同相和反相之间,这样就形成了空间中电磁场的



d —各个干涉缝之间的距离; L —缝隙屏与成像屏之间的距离; (r, θ) —成像屏上点的位置坐标; x —成像屏上点位置的直角坐标; Δx —干涉波峰之间的距离

图 1.1 光波的干涉与叠加

强弱分布。

电流分布 J 在均匀媒质中产生的辐射电磁场可表示为

$$\left. \begin{aligned} E &= -j\omega A - j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot A) \\ H &= \frac{1}{\mu} \nabla \times A \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中, A 称为磁矢量位, 它满足下列亥姆霍兹方程:

$$\nabla^2 A + k^2 A = -\mu J \quad (1-2)$$

若电流密度 J 沿 z 向线分布为 $zJ_z(z')$, 分布线长为 L , 如图 1.2 所示, 则在远场观察点 $P(x, y, z)$, 式(1-2)的解可求得为

$$A = z \frac{\mu}{4\pi} \int_L \frac{J_z(z') e^{-jkR}}{R} dz' \quad (1-3)$$

式中, 源点到场点的距离 R 表示为

$$R = |r - r'| \quad (1-4)$$

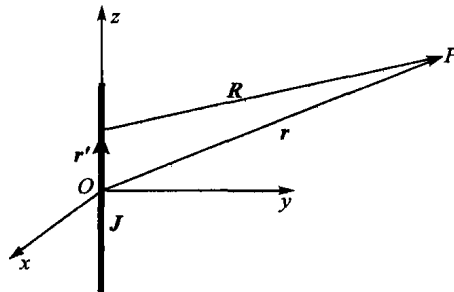


图 1.2 连续线源的辐射

如果电流密度 J 沿 xy 平面分布为 $xJ_x(x', y')$, 分布平面面积为 S , 如图 1.3 所示, 则在远场观察点 $P(x, y, z)$, 有

$$\mathbf{A} = \mathbf{x} \frac{\mu}{4\pi} \iint_S \frac{J_x(x', y') e^{-j\mathbf{k}R}}{R} ds' \quad (1-5)$$

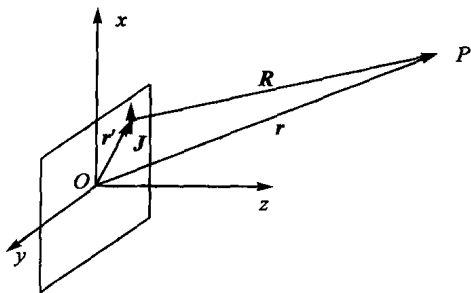


图 1.3 连续面源的辐射

同样道理, 电流如果按照其他方式分布, 如沿体分布、沿圆环分布等, 则其辐射场磁矢量位可以相应求得, 具有和式(1-3)及式(1-5)同样的形式。观察式(1-3)和式(1-5)可见, 线电流和面电流形成的辐射场具有积分的表达形式, 实际上是无穷多个部分求和叠加的结果, 这就是干涉与叠加原理在电磁波辐射问题上的体现。

若把图 1.2 所示的电流分布线或者图 1.3 所示的电流分布面离散成总数为 N 个小部分的和, 则

$$L = \sum_{n=1}^N dl_n \quad (1-6)$$

$$S = \sum_{n=1}^N ds_n \quad (1-7)$$

用 z'_n 和 (x'_n, y'_n) 表示每一小部分 dl_n 和 ds_n 的中心坐标, 如果 dl_n 和 ds_n 足够小, 则可以认为电流密度在每一小部分内是均匀恒定的, 可以用 $J(z'_1), J(z'_2), \dots, J(z'_N)$ 和 $J(x'_1, y'_1), J(x'_2, y'_2), \dots, J(x'_N, y'_N)$ 表示, 如图 1.4 所示。 $J(z'_1), J(z'_2), \dots, J(z'_N)$ 和 $J(x'_1, y'_1), J(x'_2, y'_2), \dots, J(x'_N, y'_N)$ 可根据分布线和分布面上的连续电流密度分布 $zJ_x(z')$ 和 $xJ_x(x', y')$, 用抽样手段获得。

这时, 式(1-3)和式(1-5)中的积分就可以写为求和的形式, 公式变为

$$\mathbf{A} = \sum_{n=1}^N \mathbf{A}_n = \mathbf{z} \sum_{n=1}^N A_{zn} = \mathbf{z} \frac{\mu}{4\pi} \sum_{n=1}^N \frac{J(z'_n) dl_n e^{-j\mathbf{k}R_n}}{R_n} \quad (1-8)$$

$$\mathbf{A} = \sum_{n=1}^N \mathbf{A}_n = \mathbf{x} \sum_{n=1}^N A_{xn} = \mathbf{x} \frac{\mu}{4\pi} \sum_{n=1}^N \frac{J(x'_n, y'_n) ds_n e^{-j\mathbf{k}R_n}}{R_n} \quad (1-9)$$

式中, $J(z'_n) dl_n$ 和 $J(x'_n, y'_n) ds_n$ 就是每一小部分上的总电流, 有

$$I_n = J(z'_n) dl_n \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (1-10)$$

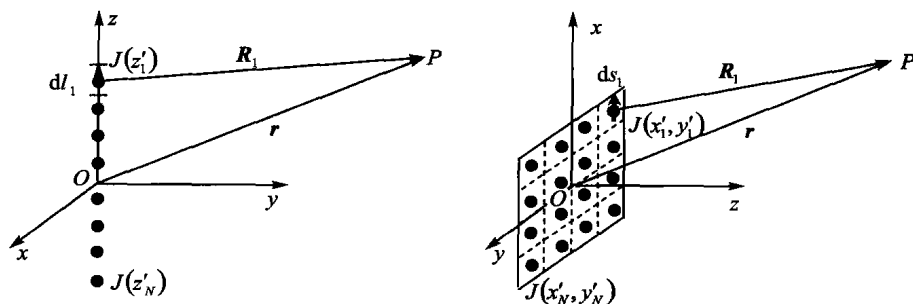


图 1.4 连续源的抽样

$$I_n = J(x'_n, y'_n) ds_n \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (1-11)$$

于是式(1-8)和式(1-9)可写为

$$\mathbf{A} = \sum_{n=1}^N \mathbf{A}_n = \mathbf{z} \sum_{n=1}^N A_{zn} = \mathbf{z} \frac{\mu}{4\pi} \sum_{n=1}^N \frac{I_n e^{-jkR_n}}{R_n} \quad (1-12)$$

$$\mathbf{A} = \sum_{n=1}^N \mathbf{A}_n = \mathbf{x} \sum_{n=1}^N A_{xn} = \mathbf{x} \frac{\mu}{4\pi} \sum_{n=1}^N \frac{I_n e^{-jkR_n}}{R_n} \quad (1-13)$$

由此可见,在空间中形成的总辐射场磁矢量位可表示为 N 个辐射场磁矢量位的叠加,因而式(1-1)表示的总辐射电磁场 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 也是由 N 个部分叠加形成的,即

$$\mathbf{E} = \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n \quad (1-14)$$

$$\mathbf{H} = \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_n \quad (1-15)$$

这就是离散源形成的电磁波辐射的干涉与叠加。

从上可以看到,把连续的电流分布离散为许多小部分的电流,形成的总辐射场完全可以表达原来的连续电流分布的辐射场,这就是阵列天线赖以存在的首要理论基础。更进一步说,以阵列天线的众多小电流源代替单个天线的连续电流分布,不仅是单个天线辐射的复现,它也带来了更大的好处。我们知道,在作为天线的导体或介质上的电流分布是取决于它所处的边界条件的,一旦天线的材料、形状、结构、安装位置、激励方式等确定后,在天线上的电流分布就是确定的,很难甚至不可能再去调整电流的分布方式,形成的辐射场和辐射特性也是确定的,难以再施加人为的调整和控制。但是,当这一单个线天线或面天线离散为各个小辐射元组成的阵列天线以后,通过馈电网络等手段去独立控制每一个小辐射元的馈电幅度和相位,再结合以小辐射元数量和位置的人为控制,就可以得到几乎任意的目标电流分布,适应几乎任意的天线应用场合,得到几乎任意的目标辐射特性,而不再需要每次对天线的材料、形状、结构等进行调整。这是阵列天线工程应用的首要优势。