

天线综合法

[苏] E.r. 泽尔金 著
B.r. 索科洛夫 著
陈祥禄 倪 湘 译

内 容 简 介

本书研究了为满足给定辐射特性而确定天线激励电流的幅度和相位、天线各单元的分布坐标以及天线其它设计参数的方法。书中对超高频天线有线型的、平面型的和曲线型的、特别是天线阵进行了研究。本书还介绍了在各种物理特性和技术特性限制条件下天线最佳化问题的求解方法。本书除了论述综合问题的经典解法外，还提供了近年来得到发展的某些数值方法。书中列举了求解各种综合问题的大量例子，其中对实际工程问题极为重要的许多例子，具有独特的意义。

本书可供从事天线研制工作的科学工作者和工程技术人员使用，也可供研究生使用。

МЕТОДЫ СИНТЕЗА АНТЕНН

Е. Г. ЗЕЛКИН В. Г. СОКОЛОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО

« СОВЕТСКОЕ РАДИО »

МОСКВА 1980

天 线 综 合 法

相控天线阵和连续孔径天线

陈祥禄 倪 湘 译

陈敬熊 姜新发 校

*

宇 航 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

空军学院印刷厂印刷

*

开本： 787×1092 1/32 印张： 12 1/4 字数： 276千字

1986年3月第1版 1986年3月第1次印刷

印数： 1—6,000 册 定价： 2.50 元

前 言

本书专门论述了按给定方向图计算辐射系统的各种方法，书中内容以E. Г. 泽尔金的第一本著作^[1]的材料为基础。

本书还参考了近年来得到的和一部分发表在期刊文献中的最新材料。例如书中引用了等距及不等距天线阵综合的新材料，研究了综合问题的近似求解法，大量地增加了曲线辐射器综合的材料，并单用一章介绍相位综合问题。

第六、八、九章及第1.3、7.2、7.3、7.4、7.7、7.8、7.9、11.4、11.5各节由E. Г. 泽尔金和B. Г. 索科洛夫合写，其余章节均由E. Г. 泽尔金编写。

作者对评论家、物理数学科学博士B. П. 亚科夫列夫以及技术科学副博士H. П. 马拉克希诺夫、B. H. 加尔马什和B. A. 卡希恩等认真审阅手稿和提出一系列宝贵意见表示感谢。作者也感谢Л. B. 科尔希在手稿准备工作中所给予的帮助。

译 序

本书是苏联学者E. Γ. 泽尔金和B. Γ. 索科洛夫关于天线综合的一本专著。它基本上总结了苏联学派六、七十年代有关这方面研究工作的主要成果，同时也部分包括西方学者（主要是美国）的一些成就。全书贯穿着苏联科学工作者一向坚持的严谨的治学态度。天线问题应属于工程性的应用科学范畴。按通常做法，只要运算上能说得过去就可以了，但本书作者却力求做到数学上的严格性。什么叫应用数学？从本书也可找到有益的回答。

全书的编排次序也是可取的。第一、第二两章是基础，将问题的提出以及处理的数学方法交待得很清楚。第四章篇幅虽不大，却抓住天线方向图是指数型整函数这个关键，这样就使逼近方法做到既严格又简单，使线天线、面天线都得到统一处理。第六章详细描述天线阵（包括线天线与面天线），将被逼近的天线方向性图作为某希耳伯特空间的一个元素，而逼近函数则取自该元素在子空间的投影。这种作法实质上等效于加权最小二乘法逼近法，后者是广大工程技术人员所熟悉的。第七章主要考虑天线参数的优化问题。道耳夫的理论及其改进得到充分阐述，增益优化中用的各种方法得到了概括。本章的最后对超增益的讨论也是使人感兴趣的。随着相控技术的成熟（特别是移相器元件）天线阵的综合自然会转移到如何用相控来达到优化目的，其原因这是由于相控比幅控更容易实现。第八章叙述相控天线阵的综合，其大部分可归结为二次泛函求极值问题。文中给出了计算步骤

及一系列方程式，给具体数字计算创造了条件。第九章写非等间距阵列天线的综合。对此问题多项式逼近法已失效，严格的求解难以得到。文章综述了多种近似处理方法。第十章讨论面阵。除少数章节外（如第七节）其处理问题的方法基本上与线天线是一样的。读者有了第四章的基础后，阅读本章不会有多大困难。本章第七节论述了如何用径向线天线的组合来逼近已知天线方向性图。这种方法在西方文献上似不多见。第十二章详细研究了曲线天线的综合问题，严格地证明了存在精确解的充要条件。这在西方文献上似未见到。

本书没有谈到工程实现问题，也没有谈到理论与试验的比较结果。在天线阵的综合中也没有考虑单元之间耦合问题。本书可作为天线专业人员精读文献，也可作为应用数学工作者的参考资料。

陈 敬 熊

1984年3月

目 录

译 序

引 言..... 1

第一章 综合问题的提出..... 4

1.1 连续孔径的基本关系..... 5

1.2 天线阵综合问题的提出.....10

1.3 近似综合问题的数学公式.....12

第二章 线型辐射器的精确求解条件

2.1 实现方向图的必要条件.....16

2.2 维纳和派利定理.....25

2.3 线型天线综合问题解的单值性.....29

2.4 线型天线阵的精确求解条件.....30

第三章 线型辐射器综合问题的求解.....32

3.1 局部方向图法.....32

3.1.1 方向图按 $S_n(z)$ 函数展开.....35

3.1.2 方程(2.2)的有限和形式解.....42

3.1.3 按贝塞尔函数展开.....45

3.2 本征函数法.....50

3.3 傅立叶积分法.....58

3.4	线型辐射器阵	63
3.5	沿直线分布的线型辐射器系统	68
3.6	等距分布的点状辐射器系统	70
3.7	用均匀阵方向图的形式表示非均匀阵的方向图	73
第四章	根据给定方向图近似计算天线	78
4.1	问题的提出	78
4.2	毕斯特洛克尔斯 (A. A. Пистолькорс) 法	79
4.3	按贝塞尔函数的展开	82
4.4	按 $S_n(z)$ 函数的展开	83
4.5	利用等距线型阵的近似法	95
4.6	利用不等距线型阵的近似法	97
第五章	论相位方向图	103
5.1	问题的提出	103
5.2	论天线的相位中心	103
5.3	相位方向图的选择	108
5.4	相位方向图的计算	111
第六章	天线阵的逼近综合法	119
6.1	基本关系	119
6.2	希尔伯特空间的逼近综合法	120
6.3	等距阵因子的代数多项式表示法	128
6.4	切比雪夫近似法	133

6.5	建立最佳近似的平方校正法	137
第七章	最佳参数天线的综合	140
7.1	无副瓣方向图	140
7.2	线型辐射器阵的最佳场分布	144
7.3	多尔夫阵的方向性系数	160
7.4	改形的多尔夫天线阵	165
7.5	线型辐射器的最佳场分布	168
7.6	准最佳线型天线	182
7.7	最佳的差方向图	185
7.8	扇形方向图的综合	186
7.9	最佳天线综合的矩阵法	191
7.10	超方向性天线的某些理论问题	197
第八章	相控天线阵的综合	210
8.1	逼近法相位综合	211
8.1.1	傅立叶系数法	213
8.1.2	梯度设计法	216
8.2	方向图的模平方综合法	220
8.3	降低相控天线阵的侧向辐射	223
8.4	利用切比雪夫范数对相位综合问题求解	230
8.5	相位综合的多尔夫问题解	233
8.6	ϵ 最快下降法	237
8.7	电流的相位分布与幅度分布等效法	239
8.8	局部方向图法	248

第九章 不等距阵的综合	252
9.1 问题的提出	252
9.2 梯度法	254
9.3 动态规化法	258
9.4 高斯积分的应用	261
9.5 函数算符运算法	266
9.5.1 傅立叶变换	266
9.5.2 拉普拉斯变换	272
9.5.3 微分方程法	274
9.5.4 伏特(尔) (Вольтерр) 方程法	276
9.5.5 有限差分方程法	278
9.6 对单元分布坐标的限制条件及单元 方向图	280
第十章 平面辐射器	288
10.1 线极化平面连续孔径	288
10.2 椭圆极化的平面孔径	295
10.3 场分布的近似计算和孔径的形状	296
10.4 给定功率方向图的天线综合	298
10.5 长方形辐射器	300
10.6 圆孔径辐射器	304
10.7 用辐射状天线逼近平面孔径法对 场分布进行近似计算	314
第十一章 平面阵	322
11.1 精确解存在的条件	322

11.2	正交等距阵	325
11.3	不等距阵	327
11.4	环形阵	328
11.4.1	单环阵	328
11.4.2	多环阵	330
11.4.3	均匀电流分布的环形阵	332
11.4.4	由N个均匀激励环组成的天线阵的 相位综合	334
11.5	最佳平面阵	338
第十二章 平面上任意形状曲线辐射器的综合		344
12.1	基本关系	344
12.2	(12.1) 型方程精确解存在的条件	345
12.3	(12.1) 型方程的求解	351
12.4	(12.1) 方程的一致性条件	353
12.5	复杂形式的曲线辐射器	355
12.6	沿平面曲线分布的辐射器阵的综合	357
12.7	$\Omega\pi, \sigma'$ 和 $\Omega'\pi\sigma'$ 类函数的某些特性	362
附录 函数 $f(y)$ 和 $R(Z)$ 之间的某些关系		369
主要符号		380

引 言

在现代无线电系统中，天线装置是极为复杂和昂贵的部件，并在很大程度上它决定了整个无线电系统的效率。只有不断改善天线装置，才能不断改善无线电系统和扩大其使用范围。因此，设计天线装置使其具有预先给定的参数，是现代无线电技术中一个极为重要的任务。

决定天线装置工作的基本要求主要体现在方向图上。针对不同的方向图参数：主瓣形式（余割方向图、扇形方向图等等）、副瓣电平或方向性系数以及差方向图下降曲率等等，这些要求可以是很不相同的。研究上述问题的天线理论简称为天线综合理论。

有许多专家从事天线综合理论的研究。最近十二年内，苏联出版了三本有关这一主题的专著〔1、2、3〕。

根据所提出的问题，天线综合法可分为两类。第一类是综合问题的精确求解法。在这种方法中，给定的方向图是属于可实现一类方向图，也就是说，沿天线孔径存在着一种场分布，它可以保证精确地产生给定的方向图形状。这里不提实现这种幅度-相位分布的实际可能性问题。这方面的问题、实现给定方向图的条件和综合问题的精确求解法，在〔1〕中有详细的研究。

第二类求解法，是给定方向图不属于可实现一类的方向图，因此不存在能使给定方向图精确再现的幅度-相位分布。在此情况下，仅提出了近似求解问题。这里可以有不同的方法和方式。例如，在〔1〕中研究了能以任意精度逼近

给定方向图的方法。但是提高精度，有时会导致沿孔径的场有急剧变化的相位分布，场的峰值又极高。这样的分布是不稳定的，实际上也是不可能实现的。

解决上述问题可以选用各种不同方法。我们选择其中的一些方法加以更详细的研究，这些方法保证取得稳定的、实际上能实现的幅度-相位分布。Л. Д. 巴赫拉赫和С. Д. 克列麦涅茨基已详细地研究了这些方法^[3]。他们所研究的用于综合问题的规则化法，使我们能避免所谓的超方向性效应。诚然，这要以损失一些给定方向图再现精度为代价。作者成功地应用这些方法来求解复杂的综合问题和平面上的曲线辐射器的综合问题等等。

但是，由于近年来电子技术和计算技术所取得的成果，天线技术也发生了许多变化。例如首先出现了各种天线阵，它们是极有前途的天线型式，有了它可以满足对无线电系统提出的各种要求。这类天线的设计有其自己的特点，尤其应该指出辐射器不等距分布的天线阵的综合问题及相位综合问题。第一个问题的解决有重要意义，因为用它可以获得大型天线阵，与相同尺寸的等距天线阵相比这种天线阵可以大大减少辐射器数量而方向图几乎没有变化。相控阵天线的广为发展，迫切地要求解决第二个问题。在相位综合中，要求只改变天线阵各单元中电流的相位分布，而不改变其幅度分布，即可获得在一定意义上近似于给定方向图的方向图。无论是相位综合还是不等距天线阵综合都属于非线性综合问题，解决这些问题要求吸取现代数学中的新成果。

所有这些问题在本书中均有论述。由于在〔3〕中已非常详尽叙述了规则化法故本书没有谈到这种方法，本书阐述了

当存在各种限制条件时对综合问题的各种不同的近似求解法。

本书同样详尽地研究了逼近综合法和最佳综合法。第一种综合法能计算出等距阵和不等距阵各单元的幅度-相位分布，这种分布保证得到以任意精度近似给定方向图的方向图。利用最佳综合法，可以不按给定的方向图形状，而仅仅根据其某些参数计算出辐射系统，并保证该参数有最佳值。例如，书中对天线阵的最佳方向性系数，方向图的宽度以及在规定方向上的最小辐射等进行了计算。

第一~五章专门阐述了连续孔径线性辐射器和线型阵的一般计算方法，第六~九章专门阐述了天线阵的计算方法。

第十~十二章研究了平面连续孔径辐射器、平面阵以及配置在平面上的曲线辐射器的计算理论。

附录中列举了一些有益于求解各种综合问题的关系式。

第一章 综合问题的提出

辐射孔径的综合问题一般可简述如下：给定空间方向图；确定孔径的形状和沿孔径的场分布，以保证得到给定的方向图。

下面主要研究平面型孔径和线型孔径。

根据孔径中场的极化性质，平面辐射器的辐射场可以有任意的椭圆极化。众所周知，电磁波具有横向特性。这就是说，电场和磁场的矢量总是在与波的传播方向垂直的一个平面内。因此，无论是在天线孔径中或在测量方向图的点上，电场总是表示为两个分量和的形式，此两分量的方向是沿相应坐标系的两个坐标轴方向。在孔径和观察点的电场矢量的分量之间存在着一定的关系，当根据给定方向图计算天线时，这些关系可以作为基本关系。

因此，根据给定的方向图和给定的极化，或者根据观察点处电场的预定分量解决平面孔径或线型孔径的综合问题时，就是确定孔径中的电场分量。

平面辐射器分为两类：沿孔径场作连续分布的辐射器和配置在平面上的不连续辐射器系统。第一类一般叫做平面型辐射器；为区别于第一类，第二类叫做平面阵型辐射器。

在个别情况下，平面型辐射器是线型辐射器。所谓线型辐射器是辐射表面的横向尺寸小于波长的天线。这种天线的例子有：有电流流动的一般导线、开凿在平面屏上或波导管壁上的窄缝隙、平板波导的开口终端、沿某线分布的不连续辐射器系统等。线型辐射器的型式有两种：直线型辐射器（简

称为简单的线型辐射器)和曲线型辐射器(其形状在平面上是某种曲线)。它们的方向图是不相同的。

线型辐射器的方向图仅在通过辐射器轴的平面内,它取决于沿辐射器的场(电流)分布函数及辐射器的相对长度(波长比)。而在与辐射器轴垂直的平面内,方向图与场分布函数无关,而仅仅取决于场的极化。曲线型辐射器的方向图同时也取决于曲线的形状,也就是两个座标的函数。

因为不是任何给定的方向图都能用平面孔径或线型孔径得到,所以确定出能使方向图精确再现的一些条件是极为重要的。如果方向图不满足这些条件,因而精确地再现方向图根本就不可能,则知道这些条件,能确定方向图的逼近方法。

由于下面只研究线性处理信号,因此根据互易原理发射天线和接收天线是等效的。所以,如“辐射孔径”、“辐射单元”、“激励辐射”以及其它术语,对发射天线和接收天线都是适用的。

在下面两节中,将叙述解决平面型和线型辐射器综合问题时所用的主要关系式,而连续孔径辐射器和辐射器阵将分别研究。

1.1 连续孔径的基本关系

假设孔径的平面与直角坐标系 xyz 中的平面 xOy 重合,而且轴 Oz 是孔径的外法线(图1.1)。

从〔4〕中已知,平面孔径辐射器在远区建立的场,可用下式表示:

$$E = -\frac{k}{4\pi} \frac{\exp(-ikR)}{R} D(\theta, \psi), \quad (1.1)$$

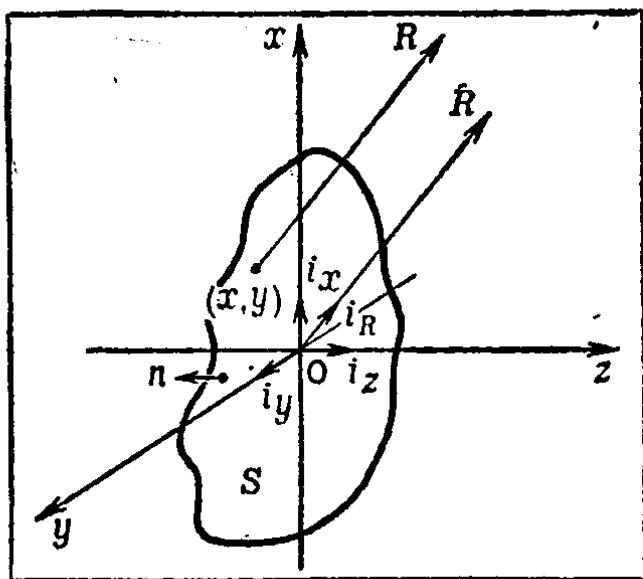


图1.1 平面辐射器和球面坐标系

式中

$$D(\theta, \psi) = [i_R(n - i_R)N];$$

$$N = \iint_S F \exp[ik \sin \theta (x \cos \psi + y \sin \psi)] ds. \quad (1.2)$$

函数 $D(\theta, \psi)$ 就是平面孔径的方向图。

因为辐射器在平面 xOy 内，则 $n = -i_z$ 。矢量 F 表示电矢量 E 在口径平面上的切向分量，或者表示沿口径流动的电流矢量。它可写为：

$$F = F_x i_x + F_y i_y. \quad (1.3)$$

把 (1.3) 式代入 (1.2) 式中，不难证明，矢量 N 同样可写为：

$$N = N_x i_x + N_y i_y. \quad (1.4)$$

式中

$$N_x = \iint_S F_x \exp[ik \sin \theta (x \cos \psi + y \sin \psi)] ds;$$

$$N_y = \iint_s F_y \exp[iks \sin \theta (x \cos \psi + y \sin \psi)] ds. \quad (1.5)$$

函数 F_x 、 F_y 、 N_x 、 N_y 一般是两个变量 x 、 y 和 θ 、 ψ 的复函数，相应为：

$$\begin{aligned} F_x &= E_x(x, y) \exp[i\psi_x(x, y)], \\ F_y &= E_y(x, y) \exp[i\psi_y(x, y)], \\ N_x &= |N_x(\theta, \psi)| \exp[i\beta_x(\theta, \psi)], \\ N_y &= |N_y(\theta, \psi)| \exp[i\beta_y(\theta, \psi)]. \end{aligned}$$

把 (1.3) 式代入 (1.1) 式中，并利用已知的公式，以单位坐标矢量 i_x 、 i_y 、 i_z 代替球面坐标系的单位坐标矢量 i_θ 、 i_ψ 、 i_R ，这时可得：

$$D = (1 + \cos \theta) [(N_x \cos \psi + N_y \sin \psi) i_\theta - (N_x \sin \psi - N_y \cos \psi) i_\psi].$$

如果在远区引进单位矢量为 q_1 、 q_2 、 q_3 的坐标系，则 D 的表示式可得到简化。 q_1 、 q_2 、 q_3 用 i_θ 、 i_ψ 、 i_R 表示如下：

$$\begin{aligned} q_1 &= \cos \psi i_\theta - \sin \psi i_\psi, \\ q_2 &= \sin \psi i_\theta + \cos \psi i_\psi, \\ q_3 &= i_R, \end{aligned} \quad (1.6)$$

那么

$$D = (1 + \cos \theta) (N_x q_1 + N_y q_2). \quad (1.7)$$

对矢量 D ，得到了与矢量 N 表示式 (1.4) 类似的表示式；两个矢量有相同的分矢量 N_x 和 N_y ，式 (1.4) 和 (1.7) 的区别仅仅是单位矢量及因子 $(1 + \cos \theta)$ 不同。

(1.5) 的两个方程是彼此独立的，即观察点处场的每个分量仅与平面孔径中场的相应分矢量有关。这就是引入