

相控阵天线特性换相测量法

作 者	Г. Г. 布勃诺夫	C. M. 尼库林
	Ю. H. 赛亚科夫	C. A. 富尔索夫
译 者	孙桂东	张福康
校 者	张福康	孙桂东 林守远
技术审定	殷连生	靖季洛

电子工业部第十四研究所

内 容 简 介

本书在对相控阵天线(ФАР)切换移相器的条件下,根据固定测试探头和相控阵天线之间的传输系数的测量数据,给出了相控阵天线特性测定方法的设计和研究结果。讨论了相控阵天线的数学模型,该模型的辐射场在形式上是阵列内各个单独(有源)辐射器场的叠加,并且,分解系数就是各通道的激励复振幅,且满足条件:第一通道的分解系数与其余通道移相器的状态无关。

分析了通过对每一个辐射器的幅度和相位及移相器的每个离散量进行检查的方法及其可能性和误差。指出方法的理论发展方向和实际应用前景。

本书适用于从事天线设备研制和设计的科学工作者。

Коммутационный метод измерения характеристик ФАР

Г. Г. Бубнов С. М. Никулин

Ю. Н. Серяков С. А. Фурсов

Издательство «Радио и связь», 1988

相控阵天线特性换相测量法

译 者 孙桂东 张福康

校 者 张福康 孙桂东 林守远

技术审定 殷连生 靖季洛

责任编辑 吕康平

*

《SSS》丛书编辑部 出版

十四所情报信息中心 印刷

140mm×203mm 1/32 130千字

1996年8月第一版

内部书号:SSS-016

出版序言

相控阵天线系统是比较有前途的天线设备之一,近年来它的应用越来越广,人们对它的要求也越来越高,不仅要求天线波束的扫描速变更快、指向精变更高,而且要求天线有较低的副瓣电平。为此,除了要求提高移相器相移状态的更换速度和相移的置位精度外,为了确保相控阵天线的低副瓣电平(尤其是大型相控阵天线),激励天线单元的各通道幅相测量和调整是非常必要的。

测量相控阵天线,尤其是大型相控阵天线的辐射特性是一个复杂的技术课题,传统的远场测量法不仅需要花费大量的时间和设备,而且这种方法很难对相控阵天线各个通道的激励幅相单独进行检查。相控阵天线特性换相测量法一书是对俄技术合作中俄方专家赠送的专著它不仅反映了作者最近几年在相控阵天线测量中的研究成果,而且我们可以了解到前苏联在相控阵天线研究方面的概貌。

相控阵天线特性换相测量法利用了相控阵天线的结构特点和各个通道能单独进行控制的可能性以及阵中单元方向图和移相器参数等的先验知识,使得在相控阵天线和测量探头都固定的条件下进行测量时,大大减少相控阵天线参数的测量时间。

该书对从事相控阵天线研究工作的人员很有帮助,所以我们组织有关人员翻译出版此书,以促进我们在相控阵天线,尤其是在有源低副瓣相控阵天线方面的研制水平的提高。

本书出版得到有关领导和许多同志的支持,在此表示感谢。

由于该专著专业性较强,涉及面较广,而我们水平有限,时间又比较仓促,因此,虽然我们尽了较大的努力,但难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

电子工业部第十四研究所

靖季洛 殷连生

1996年10月

前 言

相控阵天线(ФАР)是比较有前途的天线设备之一,近年来它在各种不同的无线电系统中得到越来越广泛的应用。这是由于它能迅速改变相控阵天线的波束指向,形成特种方向图(ДН)及在一部天线上兼有要几部其它品种天线才能完成的多种功能。

但是,要使上述能力付诸实现,在相控阵天线的制作和试验过程中,必须进行大量的工作,这些工作牵涉到相控阵天线的调试、排除天线阵内有故障的单元及测定与相控阵天线及所属系统各种工作方式相适应的方向特性。

测量辐射器达几万个的现代相控阵天线的辐射特性是一个复杂的技术课题,以测量天线周围空间场分布为基础的传统测量方法需要化费大量的时间和设备,此外,这种方法很难对相控阵天线的各个单独通道的激励进行检查,而这对相控阵天线的调试是必须的。相控阵天线的特点是相应于不同的配相存在多种方向图的集合,为了测定每个方向图,用传统方法必须个别进行试验。

在测定相控阵天线参数的技术方面,实质性进展是在下列方法的基础上取得的,这些方法利用相控阵天线的结构特性。利用专门控制它们各通道的可能性,利用方向特性和辐射器配置及移相器参数等等的先验信息,归入这类方法的有调制法和换相法。

书中所讨论的方法能大大减少相控阵天线参数的测量时间,因为主要测量是在相控阵天线和探头都固定的条件下进行的,并且所有的方向图都可以根据一次试验结果就能够复原。方法的基础是线性数学模型。根据此模型相控阵天线可用少量的几个参数——各个通道的激励复振幅和辐射器的平均方向图加以描述。辐射器的平均

方向图的选取可由阵列某一段的预先试验确定,或是由理论方法确定。主要试验内容就是当位于相控阵天线各通道内的所有移相器换相时,测量相控阵天线和探头之间的传输系数,由试验数据的处理结果我们确定任何配相状态下的各通道的激励复振幅和辐射特性。

书中相当完整和有序地叙述了作者最近几年取得的换相法研究结果,研究了该方法的信息量和误差,解决了制定试验步骤的问题,给出了快速计算移相器控制码和处理测量结果的算法,该算法允许对辐射器量大的相控阵天线使用换相法。试验研究证明了该方法的高效率并允许进一步完善这些方法。不过在书中方法的实际应用中,由于相控阵天线结构差异很大,可能会产生一些新的问题。

本书对从事天线测量的工程师们也将是有益的,在书内他们可以找到该方法在实际应用中需要的足够信息。

主 要 符 号

a^T —转置矢量

a^* —埃尔米特共轭矢量(转置和复共轭)

A —矩阵, $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$

A^{-1} —逆矩阵

A^+ —莫尔—片罗茨广义逆矩阵(伪逆矩阵)

$\|a\| = (a^*a)^{1/2}$ —矢量范数

$\|a\|_p = (a^*Pa)^{1/2}$ —矢量加权范数

$\|A\| = (\sum_{i=1}^n \|a_i\|^2)^{1/2}$ —矩阵范数

$\text{cir}\{a_i\}_{i=1}^n$ —由每一行 $\{a_i\}$ 向右循环旋转而组成的循环矩阵

$\text{diag}\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ —对角线矩阵

$\text{diag}\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ —分块对角线矩阵

I —单位矩阵 $I = \text{diag}\{1, 1, \dots, 1\}$

$A \otimes B$ —克罗内克尔矩阵(直接)积

$\mathcal{R}(A)$ —矩阵 A 的象集

$\mathcal{N}(A)$ — A 矩阵核

$P = A^+ A$ —在 $\mathcal{R}(A^*)$ 上的射影算子

R_N —欧几里得的 N 维实空间

C —欧几里得的 N 维复空间

$n = (\alpha_{s-1}, \alpha_{s-2}, \dots, \alpha_0)$ —整数 n 以 L 为基数的 S 位展开式

$\bar{n} = (a_0, \dots, a_{s-1})$ — L —反演数

$\mathcal{E}[a]$ —数 a 的整数部分

$l \bmod L$ — l 被 L 整除的余数

$a \oplus_L b$ —数 L 模的和

$a \ominus_L b$ —数 L 模的差

δ_n —克罗内克尔符号, $\delta_n = \begin{cases} 1, l=k \\ 0, l \neq k \end{cases}$

$\delta(l) = \delta_{nl}$

$\delta_L(l) = \delta_{0,l \bmod L}$

$\text{Wal}(n, i)$ —从属于自变量 i 的 n 阶沃尔什离散函数

$f(x) = \mathcal{O}(g(x))$ —序列 f 不超出序列 g

M_ϵ —随机是 ϵ 的数学期望

目 录

第一章 用固定探头测定相控阵天线特性	(1)
1.1. 相控阵天线的构成图和微波元件	(1)
1.2. 相控阵天线的主要特性及其测量特点	(7)
1.3. 利用相控阵天线的数学模型测定其特性	(10)
1.4. 根据功率测量确定相控阵天线各通道的传输系数	(14)
1.5. 用调制法确定相控阵天线通道的传输系数	(18)
1.6. 换相测量法	(21)
1.7. 测量辐射器的局部方向图	(26)
1.8. 两级配相电路时换相法的特点	(29)
第二章 换相法的信息量	(34)
2.1. 解测量方程	(35)
2.2. 相控阵天线的故障鉴别	(52)
2.3. 偏差评估	(56)
第三章 制定试验步骤	(60)
3.1. 按单元控制	(62)
3.2. 以循环和双位二进制位移为基础的控制	(64)
3.3. 以沃尔什函数为基础的控制	(73)

3. 4.	最佳控制	(78)
3. 5.	随机控制	(97)
3. 6.	相控阵天线的波束扫描	(108)
3. 7.	测量探头的最佳配置	(112)
第四章	方法和设备误差分析	(117)
4. 1.	换相法测试台	(117)
4. 2.	设备误差	(120)
4. 3.	方法误差	(124)
4. 4.	相控阵天线方向图和增益的复原误差	(133)
4. 5.	测试试验台的鉴定	(138)
文献目录		(139)

第一章 用固定探头测定相控阵天线特性

1.1 相控阵天线的构成图和微波元件

相控阵天线电路设计、结构形式和微波元件及其控制方法方面的千差万别是相控阵天线理论和技术蓬勃发展的结果〔1—6〕。由于这里所讨论的测量方法极大地依赖于相控阵天线的构成特性,故必须将相控阵天线中,能使他们成为这些方法的潜在对象的共同部分分出来,本章给出了对叙述本书主要材料必不可少的有关相控阵天线的概述。

相控阵天线是这样一种天线系统,该系统的辐射部分可分成许多用相位进行控制的通道激励单元。在类似型号的天线阵内广泛应用的电扫描方法之一是相位法。波束扫描所必须的天线阵各通道激励相位的变化,用电子设备——移相器实现移相,移相器的惯性比用在机械扫描或机电扫描中的设备惯性要小几个数量级。

目前正在应用和正在研制用于不同频段的千差万别的各种相控阵天线,其配置在平面和曲面上的辐射器数量是从几百个到几万个〔1〕。研究比较充分和研制较集中的是平面阵列,在大多数情况下,该平面阵列由配置于有双周期性的平面坐标栅格(较为常用的是直角栅格和六角形栅格)结点上的相同的辐射器组成。由于辐射器之间的相互影响,激励相控阵天线每一个通道的不仅是接通的那个辐射器,而且还有相邻的(严格讲是所有的)辐射器。由于此种原因,相控阵天线的辐射部分时常做成单一的天线装置(平板),并向该装置的不同点接通各个激励通道。

采用光学型和闭合通道型(注:指强迫馈电)功率分配器使相控

阵天线各通道激励。光学型电路通常有两种形式：直通型和反射型（图 1.1）。在第一种情况下（图 1.1a），激励源能量射到收集阵列，通过微波网络和移相器，然后用另一个阵列将能量转发出去；在第二种情况下（图 1.1b），收集和转发阵列的功能由同一个阵列完成。

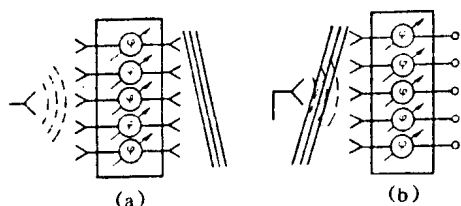


图 1.1 光学型相控阵天线各通道的激励电路

(a)一直通型

(b)一反射型

闭合通道型分配器线路有多种不同的形式，作为功率分配器可以采用各种不同的部件：波导和同轴和 T 型三通，波导电桥，耦合微带线定向耦合器，微带线环形功率分配器等。

除所列举的功率分配器电路外，还可能有组合式电路。

为了对相控阵天线各通道的激励相位进行控制，在大多数情况下采用所谓离散动作的数字移相器（铁氧体的和半导体的）。直通式数字移相器由 P 级组成，它们之中的每一级都可能处在两种状态中的一种，该两种状态表征所引入的相移 φ_m 或 $(\varphi_m + \pi \cdot 2^{1-m})$ ，式中 m 为级编号 ($m=1, 2, \dots, P$)， φ_m 为某个初始相移，为了从 $L=2^P$ 可能状态中选取任一种状态，利用二进制控制信号 P 就足够了（采用规定 0 或 1）。

除数字离散移相器之外在相控阵天线上还用连续接动作的铁氧体移相器。由这种移相器引入的相移是流过磁化绕组电流的函数，为了模拟控制铁氧体移相器，照例是采用直流放大器，所需相移的信息以模拟电压的形式送至放大器的输入端，并在输入端和校准信号相叠加，而校准信号随铁氧体温度和微波信号频率（补偿铁氧体频率色散）的变化而变化。借助确保输入信号和控制相移之间线性传输函数的形式电路，减少移相器特性的非线性。为了消除由铁氧体磁滞所形成的误差，在选取移相器给定相移之前先将铁氧体磁化到饱和。书

中讨论了模拟铁氧体移相器当作离散型使用的问题,这样使用对简化控制线路和提高可实现的相移稳定性很有必要。在此情况下,控制电流有一组值 $\{i_1, \dots, i_L\}$ 与一组可实现的相移值 $\{\varphi_1, \dots, \varphi_L\}$ 相对应,一次近似时, $\varphi_i = \varphi_0 + \beta(i-1)$,式中 β 为移相器的相位特性斜度。一般说来,参数 φ_0 和 β 能完整地表征移相器;但是在控制电路被简化的情况下,有时还必须知道全部可实现的相移数值组。

移相器的一些特性,如相移的调定误差和微波功率损耗对这里所讨论的测量方法来说很重要,列入文献[5]的不同作者对移相器损耗所作研究的综合结果很有意义。在图 1.2. 上标明了半导体(二极

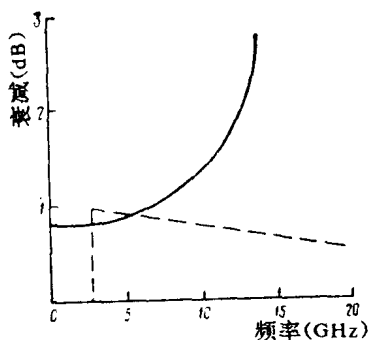


图 1.2 各种移相器的损耗界限

- 二极管移相器的损耗下限
(当脉冲功率小于 12kW 时)
- 铁氧体移相器上限

管)和铁氧体移相器损耗与频率的极限关系曲线。铁氧体移相器的损耗范围为(0.4~0.8)dB,相应情况下半导体移相器损耗可达到(3~5)dB。移相器损耗的工艺偏差不得超过 ± 0.5 dB,即按幅度值小于6%(对半导体移相器其损耗依赖于半导体状态,这种依赖关系对一种结构的所有移相器具有代表性。)

应该指出,移相器的损耗随微波信号功率的增大而上升。测量通常在低功率电平进行,因为这种情况下移相器内的损耗小。这种情况对换相测量法是有利条件。

用于现代多通道相控阵天线的移相器相移调定误差通常是低位离散值一半,在必须的情况下,该误差可降到 $5 \sim 10^\circ$ 。

为了节省无线电元件和电路、为了简化结构和提高可靠性,大多数现代相控阵天线的移相器控制都以行—列原理为基础。当将各个

辐射器配置于直角或六角形栅格的结点时,相控阵天线显然可划分为行和列,因而控制电路也可按此自然划分进行相应的设计。

移相器的控制电路可分为两种主要类别,属于第一类的是允许独立控制移相器的所有电路,即此种电路内的每一个移相器可以处于任何一种状态而与其余移相器的状态无关;属于第二类的是不允许在个别移相器组内(甚至全部)实现独立控制的电路。

例如,用来控制两位二进制铁氧体移相器的电路(图 1.3)就属于第一类电路。用复位脉冲 R 和送至放大器 $A_1, A_2, \dots, A_n$ (n —行数)的置位脉冲 S_1, S_2 使铁氧体绕组元件进入饱和并借助开关 $K_1, K_2, \dots, K_m$ (m —列数)选择列。该电路虽然是行—列设计原理,但允许独立控制移相器,可依次将移相器置位到所需状态实现配相。

控制两位二级管移相器的行—列电路属于第二类电路(图 1.4)

移相器控制码由行和列二进制码的和组成(带进位),移相器位于行和列的交点上。有 L 种状态 $\{0, 1, \dots, L-1\}$ 的移相器,在通常情况下,它的状态按沿行和列传送的数之和(按模 L)来计算,也就是 $L = (L_r + L_c) \bmod L$ 。这样的电路确保同时控制所有的移相器和形成使相控阵天线波束指向任何方向所必须的相位波前。图 1.4 电路比图 1.3 电路速度快,但控制的灵活性较小。

可用图 1.5 电路对连续动作的铁氧体移相器进行行—列控制。每一个移相器有一个带有两个磁体绕组的绕组元件:行绕组和列绕组,所有的行绕组在一行内串联,而所有的列绕组在一列内串联。移相器的复位和相移设置由相应的电流 $i_1, i_2, \dots, i_n, j_1, j_2, \dots, j_m$ 保证,并且对于位于行 m 和列 n 交点上的移相器,如果认定行和列绕组是等同的,则移相 $\varphi_{mn} \approx \varphi_{0mn} + \beta_{mn}(i_n + j_m)$ 。为使相控阵天线的波束能偏向任何方向,应该保证移相器相移范围为 $0 \sim 4\pi$,而每个磁化绕组——应保证相移范围为 $0 \sim 2\pi$ 。当电流从一组有限的离散值中选取某些值时,连续动作的移相器实际上就变成了离散的,但确定它的状态数并不简单。例如,如果电流选取 L 个值,则移相器可能处于 L^2 个状

态。由于连续动作的移相器其数 L 通常大于离散动作移相器,

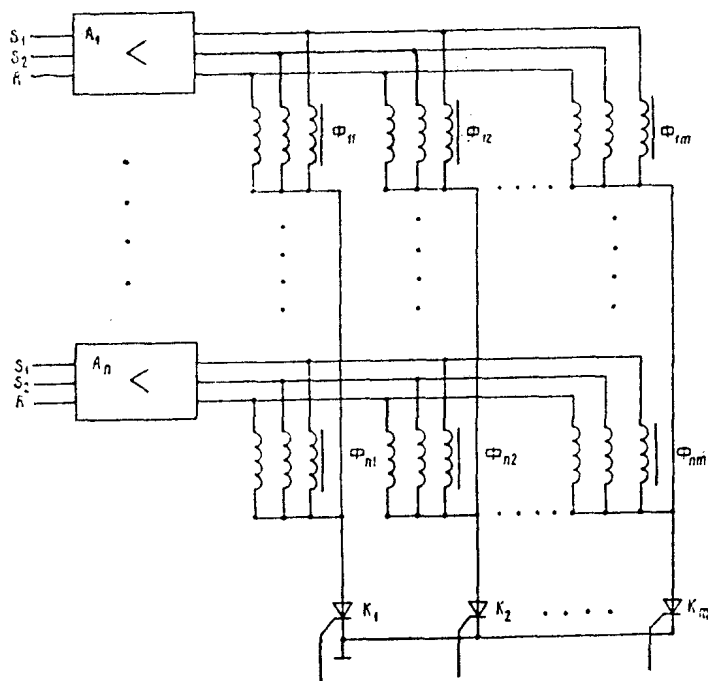


图 1.3 两位二进制铁氧体移相器的控制电路

且 L 可能达到 32, 甚至更大, 则状态数 L^2 就变得很大了, 因此应该想法简化这种移相器的模型。如此看来, 如果行和列绕组是等同的, 而电流取其稳定值 $i = i_0 + l\Delta i$, $j = j_0 + k\Delta i$, 则这种移相器等效于具有一个磁化绕组的移相器, 通过该绕组的电流为 $i = i_0 + j_0 + \Delta i(k + l)$ 。可以证明, 这种情况下移相器的不同状态数 $(2L - 1) \ll L^2$ 。

通道数很大的天线阵, 通常具有组件式结构, 这种天线阵的单个组件本身就是带有个别控制波束的独立的相控阵天线。这种构成能够解决几个问题: 组件加工、调试和参数测量能在工厂条件下完成, 因而简化了相控阵天线的整体调试。

组件式相控阵天线至少有两级配相(图 1.6), 属于第一级的是

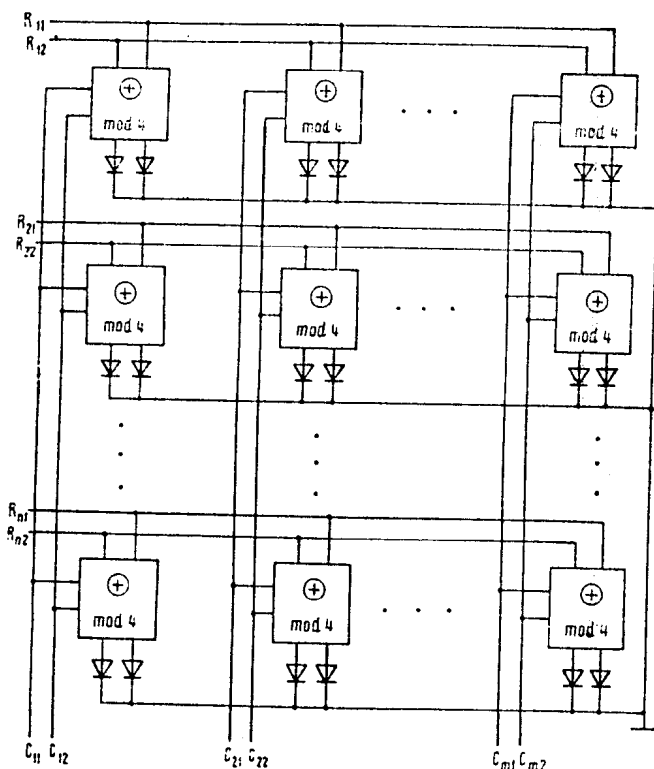


图 1.4 两位二进制二极管移相器的控制电路

组件的各个移相器,第二级移相器配置于组件的各个激励通道内,它们是一些可控延迟线,将相位移动 $\Phi = 2\pi n$, $n \gg 1$ 。延迟线对于增大组件式相控阵天线的信号频谱宽度是必不可少的。由于延迟线不可能制作得很精确,则剩余相移 $\Phi_{\text{mod}2\pi} \in [0, 2\pi]$ 用第一级移相器或是附加移相器来抵消。

通常,相控阵天线的每个组件和本身的微波振荡器(放大器)接通,因此,在这类天线阵内每个组件内的微波信号的关断是用断开振

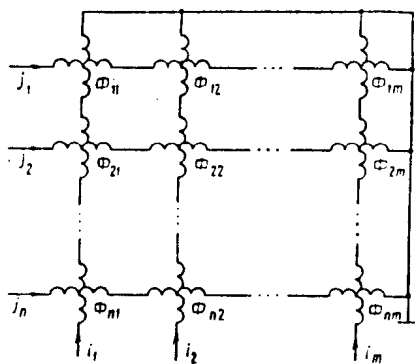


图 1.5 连续动作的铁氧体移相器的控制电路

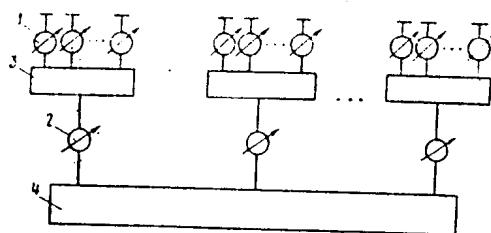


图 1.6 组件型相控阵天线图

- 1—第一级移相器 2—第二级移相器
3—组件功率分配器 4—相控阵天线功率分配器

荡器电源电压的方法来达到。在有源相控阵内也有类似的断开每个辐射器的功能。

1.2 相控阵天线的主要特性及其测量特点

为了描述相控阵天线的性能，仍利用描述其它天线性能的参数：方向图（ДН）、增益（KY）、方向性系数（КНД）等等，相控阵天线的特点在于它具有和主波束不同位置相对

应的方向图集（合），这将导致测量工作量大大增加。相控阵天线试验时测量的总工作量，严格讲，包括在其不同的工作方式时，在各工作频率的频段内及波束扫描的扇形区内测量所有的方向图。按照文献〔7〕所进行的评估，在扫描扇形区 45° 内，对增益为

40dB 的相控阵天线，移相器的低位离散量 $\Delta\varphi = \pi/4$ ，其波束的可能位置数等于 $2.5 \cdot 10^7$ 。与此同时，相控阵天线的所有辐射特性又可以通过有限的参数组——天线阵各通道的辐射特性来表示，这样可以大大减少测量工作量。

在计算相控阵天线的辐射场时，像对待任何天线一样，可以看成

是空间内的给定电流系统。天线辐射场和在该天线表面上的电流分布单值地联系着,因而可用积分法确定。而对相控阵天线——可用各个离散辐射器场的求和来确定。矢量复(数)方向图 $F(k)$ 是比较完整的天线辐射特性, k —波矢量。相控阵天线具有的方向图不是一个,而是一个方向图集 $F(k, k_0)$, 该集和波束的不同位置 k_0 相对应。

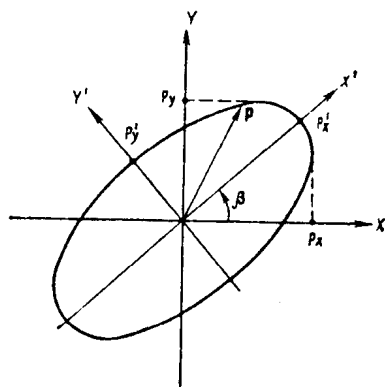


图 1.7 极化椭圆

矢量方向图较方便的表现形式是矢量方向特性的乘积 $P(k, k_0)$, 该特性满足条件 $|P|=1$, 并且叫做极化特性, 而 $F(k, k_0)$ 叫做标量方向图。远场区的辐射场满足条件 $kP=0$, 即与波的传播方向相平行的场分量。因此, 矢量 P 永远位于和传播方向垂直的平面内, 并在此平面内描绘成一个极化椭圆, 在特殊情况下, 极化椭圆蜕变为一条直线或者一个图(图 1.7)。

极化椭圆由角度 β 和等于椭圆短、长半轴之比的轴系数 r 决定。参数 r 和 β 与场正交分量的幅度比 $a = |P_x/P_y|$ 及它们之间的相移 $\varphi = \arg(P_x/P_y)$ 有关, 具体关系式有:

$$r = \frac{2a \sin \varphi}{1 + a^2 + \sqrt{1 + 2a^2 \cos 2\varphi + a^4}}, \quad \beta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2a \cos \varphi}{a^2 - 1} \right)$$

函数 $F(k, k_0)$ 的模数 $A(k, k_0)$ 和自变量 $\Phi(k, k_0)$ 分别叫做幅度方向和相位方向图, 从属于一个角座标的关系式 F 叫做方向图截面, 通过方向图最大值的截面叫做主截面。方向图截面不能对相控阵天线性质进行完整描述, 而信息量最大的是立体方向图。