

# 天线近场测量技术探讨

## 1 引言

天线特性参数的测量有多种方法，目前，主要的方法包括三大类：天线的远场测量、天线的紧缩场测量、天线的近场测量。其中，因天线特性主要是定义在天线的远场区故远场测量更为直接准确，而紧缩场测量天线主要是拉近远场所需远场条件： $d \geq 2D^2/\lambda$ ，其通常采用一个抛物面金属反射板，将馈源发送的球面波经反射面反射形成平面波，在一定远距离处形成一个良好的静区。将天线安置在静区内，测量天线的远场特性，其类似于远场测量，只是缩短测量距离，便于在理想远场环境（暗室）下进行测量。

比较而言，天线近场测量技术应用更为广泛，其对设备要求低，不需要造价昂贵的暗室环境，也不需要远场测量下，对射频系统的较高的要求。

传统的远场测量由于受地面反射波的影响，难以达到这么高的测量精度。另外，远场测量还受周围电磁干扰、气候条件、有限测试距离、环境污染和物体的杂乱反射等因素的影响，已经越来越难以适应现代卫星天线的测量要求。新一代的天线测量技术是以近场测量和紧缩场测量为代表的。近场测量技术利用探头在天线口面上做扫描运动，测量口面上的幅度和相位，然后把近场数据转换成远场。由于近场测量只需测量天线口面上的场，就可避免远场测量的诸多缺点，而成为独立的一门测量技术。

近场测量技术主要是指频谱近场测量技术，通过研究被测信号的频谱结构进行频谱分析，从而得到近场天线的各项参数。与远场测量不同的是，其通过采集天线近场区域辐射场的数据，经近场——远场变换，由计算机得到天线的远场特性。只要保证一定的幅度和相位测量精度，即可较为准确的得到远场特性。

频域近场测量中，信号源发射连续信号，适用于频域平面波谱分析，在时域近场测量技术中，信号源发射的是脉冲信号，用时域平面波谱分析比较合适。

1994 来，美国的 Rome 实验室的 Thorkild R. Hasen 和 Arthur D. Yangjian 提出了时域平面近场测试方法，并推导出时域内的格林函数表达式和平面波谱表达式，同时分析了探头误差分析与修正公式。国内在此领域研究比较少，北京理工大学搭建了国内第一个时域近场测试系统[1]。

天线的测量经历了一个从远场测量到近场测量的发展过程。远场测量是直接在天线的近场区对天线的电磁场进行测量，所以测量场地和周围范围电磁环境对测量精度影响比较大，对某些天线来说，要求测量距离要远大于  $2D^2$ ，其中  $D$  为被测天线的口径尺寸， $\lambda$  为工作波长，而且对测量场地的反射电平、多路径和电磁环境干扰的抑制都提出了很高的要求，这些要求在远场条件下往往很难满足。

随着测量设备和计算手段的不断进步,天线的电气特性可以在微波暗室内通过近场测量更方便、更精确的测得。

近场测量是在天线近区范围内,求得天线的远场特性。由于其不受远场测试中的距离效应和外界环境的影响,故具有测试精度高、安全保密、可以全天候工作等一系列优点,并且能很好的模拟和控制各种电磁环境,并通过合适的软件有效的补偿各种测量误差,其测量精度甚至优于远场测量,从而得到越来越多的应用,一直是人们研究的重点课题,也是当前高性能天线测量的主要方法之一。

天线近场测量经历的阶段:

时间 研究内容

1950~1961 年 无探头修正探索阶段

1961~1965 年 探头修正理论研究阶段

1965~1975 年 实验验证探头修正理论阶段

1975~至今 推广应用阶段

早在 20 世纪 50 年代,国外已经开始了天线近场测量的研究。国内的近场测量的理论研究及实验探索开始于 20 世纪 80 年代,西安电子科技大学在 1987 年成功研制了我国第一套天线近场测量系统[3]。矢量网络分析仪作为天线近场测量系统的核心设备以及射频和微波产品性能的主要测试仪器,多年来在精度、速度、动态范围和操作界面等方面都有较大的改进,对天线近场测量系统的性能优化起了很大的推动作用。

## 1 天线近场扫描法测量系统

近场测量方法包括:场源分布法、近场扫描法、缩距法、聚焦法和外推法等,这些方法各有其优缺点及适应范围。本文主要讨论近场扫描法来测量天线各项特性。

近场扫描法是用一个特性已知的探头,在离开待测天线几个波长的某一表面进行扫描,测量天线在该表面离散点上的幅度和相位分布,然后应用严格的模式展开理论,确定天线的远场特性。测量面可以是平面、柱面或球面,相应的近场扫描法称为平面、柱面或球面近场测量。从上世纪 80 年代初,我们开始了对近场测量技术的研究,于 1987 年研制出了我国第一套近场测量系统。此后一直从事天线近场测量技术方面的研究及推广。

任何近场测量方法，都需在指定的曲面上规则地采集幅度和相位数据。给定曲面几何形状，数据和参考天线（探头）的特性，通过测量天线的近场特性，经近场-远场变换，由计算机处理、确定待测天线的远场特性。

最常用的扫描技术包括：平面近场(PNF)，柱面近场(CNF)和球面近场(SNF)。每一种都需将平动与转动组合实现在理想表面上的扫描。

近场扫描法测量系统主要由射频子系统，扫描子系统，数据采集处理系统等组成。最简单的射频子系统包含能够向 AUT 提供射频功率的某种类型的信号源以及能够检测探头接收信号的接收机。在数据采集系统中，幅度和相位数据在测量表面的已知位置（如文中的网格点处）采集，通过扫描探头对特定位置处场值的记录，计算机存储生成所测得的数据，再由计算机通过傅里叶变换实现近场远场数据转换，从而得到天线的远场特性，再可由 matlab 软件绘出相应远场的幅值和相位随位置的变化波形图。整个系统的转台及定位均有数据采集与控制系统（DCCS）监视并控制，因而，需由电脑全自动控制，这样既保证转台转角的精度，各背景的恒定，以尽可能减小外界额外环境的干扰，提高测量准确度。此外，由于对天线近场的测量点非常多以及每次参量的变化对背景的重新测量，得到的数据量极大，计算机发送接收这些数据

## 2 天线近场测量机械扫描子系统

任何近场测量理论中，幅度和相位数据是在某些特殊面上按规律的方式获取。给定面的几何形状，数据和参考天线（探头）的特性，优先选用一种高效的变换来确定待测天线的远场特性。最常用的扫描技术有平面近场（PNF），圆柱面近场（CNF）和球面近场（SNF）。每一种都需要将平移与转动相结合完成理想面上的扫描。

### 3.1 PNF 近场扫描

PNF 扫描要求较小的暗室环境，校准技术和相当简单的数理分析。该技术最适合于像碟状或相位阵列这样的高度定向天线，这类天线几乎所有的接收和发射的能量都会通过平面扫描区域。

矩形扫描是一种常用的 PNF 技术，如图 1 所示，扫描的数据是在网格上特定的  $x$ ， $y$  点处收集得到。探头放置在沿  $y$  轴的直线滑轨上。 $y$  轴滑轨安放在沿  $x$  轴向上的第二个滑轨上。

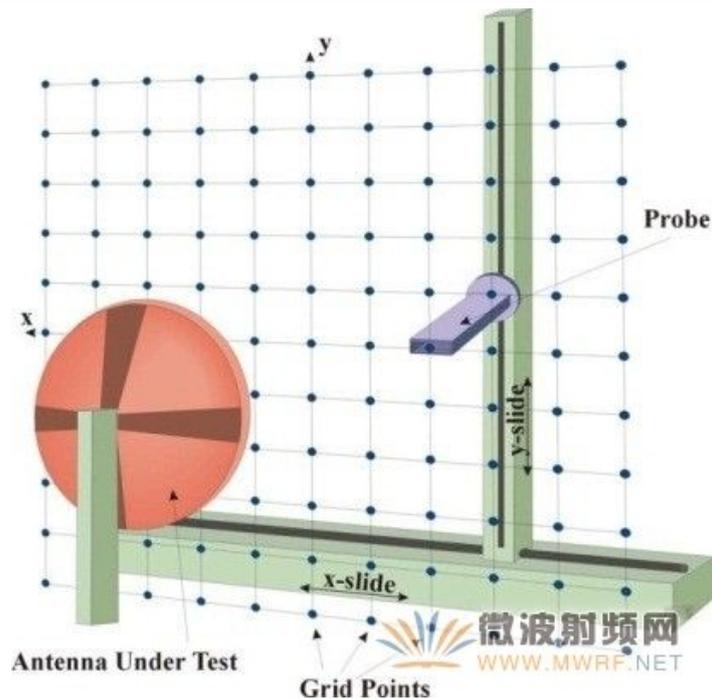


图 1 PNF 近场扫描

平面近场扫描仪由一对正交安装的导轨组成，其中竖直安装的导轨在水平安装导轨上面，探头安装于竖直导轨上扫描整个平面。扫描平面一般与待测天线的口面平行。扫描架需调整至  $x$  轴和  $y$  轴垂直。

采样是测量数据中两相邻数据所需的最短周期。在  $x$  和  $y$  方向小于  $\lambda/2$  的步进间隔一般都能满足采样准则。

当然，理论上假定无限大的扫描平面在实际应用当中很显然极不现实。为了确定扫描区域是否足够大，通常是将某扫描区域边缘之外的数据设置为零，并观察计算出的远场变化多大。当远场变化比较明显时，说明扫描区域内测得的数据量过少，应适当的增加扫描点数，从而保证经变化得到的远场近似于待测天线的远场。减小由边界截断带来的测量误差。

PNF 还需考虑各种校正处理，如：电缆抖动、探头位置、阻抗失配、热漂移校准等。这些校正理论的发展很大程度上提高了近场扫描的测量精度，促进了近场扫描在实际中的应用。

### 3.2 CNF 近场扫描

典型的柱面近场扫描设备是将待测天线安装于转台之上，扫描探头沿平行于转台转轴的直线方向上移动。通过合理地配置这些运动，准确的定位需要测量的

网格点位置，保证探头能够在柱面特定的网格点处获取近场振幅和相位数据。同样通过计算机对数据经近场远场变换处理，来得到天线的远场特性。同平面扫描相比，柱面扫描对转台控制更为复杂，即对机械系统提出了更高的要求。由于其是对待测天线周围柱面空间的场进行测量，那么，对于波束俯仰角较小而方位角范围较广的天线，这种测量的结果相对于平面扫描信息量更大，误差更小，对天线特性的反映更为准确。

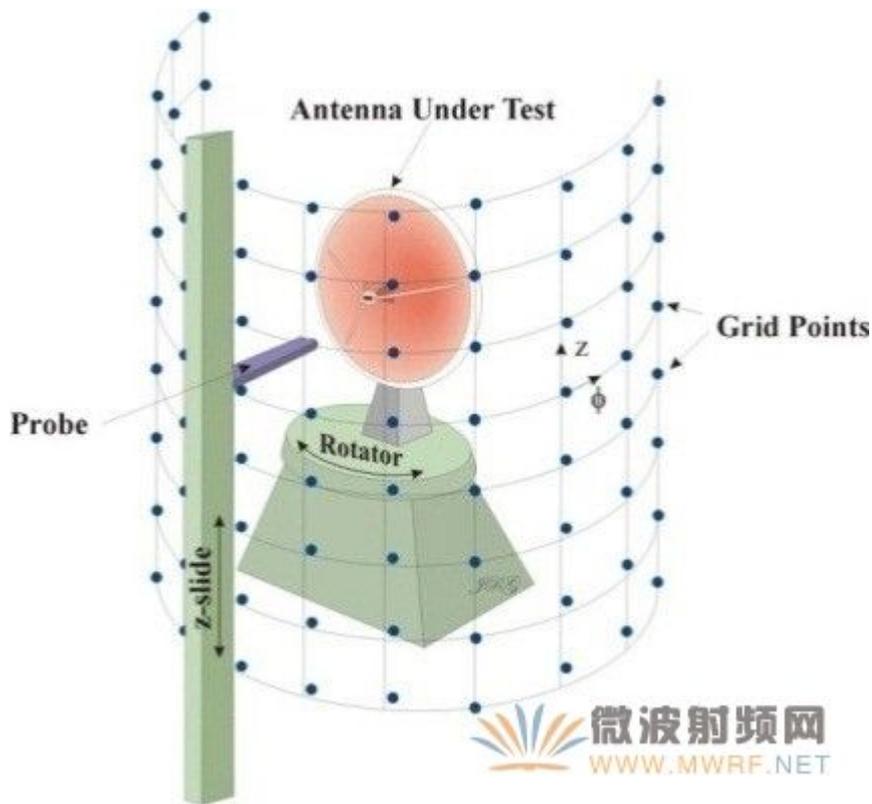


图2 CNF 近场扫描

柱面测量系统中，待测天线位于方位转台之上，其口径面边缘垂直于地面，探头沿垂线方向上进行扫描，位于方位转台之上的待测天线沿圆周运动。转动待测天线，垂直方向上扫描一次，一周之后，可完成整个柱面的扫描，该系统的示意图如图2所示[4]。二者的组合运动在柱面上形成了Z，相互关联的采样格点。

测试中，需调整扫描轴是其彼此对准并保证铅垂到位。探头运动的直线扫描需调整到平行于方位转台的转轴，并垂直于大地。方位转台必需保证在指定的扫描范围内能稳定地圆周运动，并且转轴平行于探头扫描线迹。

同样，柱面扫描的采样也做如下规定：根据奈奎斯特准则，相邻数据的采样间隔不应大于最高频率所对应波长的一半  $\lambda/2$ ，以保证重要的频谱分量都被囊括其中。每行的间隔可参照平面扫描，扫描的行数也可通过观察行数变化对远场的变化的影响程度做适当调整，也可通过计算机对天线辐射特性的数值计算仿真优化测量范围。

### 3.3 SNF 近场扫描

天线测量技术的理论基础是传输方程,其是表征一个天线在另一个天线发射状态下的接收信号。第一个天线的接收特性和第二个天线的发射特性都表达于传输方程之中。

在 SNF 扫描中,数据从围绕待测天线的球面上采集得到。这种方法可用于测量任何天线,特别是对于全向或近似全向的天线特别有用,这类天线不适合采用平面和圆柱面理论进行测量。

球面近场扫描中,导轨转动的精度及控制对测量结果的影响相对于其他两种方法,其要求较高,实现的难度更大,但球面测量是对天线周围空间的完整测量,其最能完整的体现天线的辐射特性,理论上的误差最小,测量的精度最高,也是未来近场测量发展主要的趋势。

在测量球面 $(A, \theta, \phi)$ 的任意点上,探头必需指向球心并对两个正交极化进行采样。理论上,两个天线谁相对谁运动并不紧要。或许待测天线固定、所有旋转由探头实现,或许待测天线两轴旋转、 $x$  探头绕轴旋转,或许测天线一轴旋转、探头绕两轴旋转。

球面装置的一个例子是由一个弧形臂和转台的共同组成,该拱形臂使得探头可在一个圆弧上运动,转台可使天线绕方位角轴旋转。圆弧平面可能垂直,方位角轴位于平面内且垂直此平面。

## 4 结论

PNF 方法对高度定向天线效果最好。其可用于定向天线的增益测量,但其对覆盖的方向图区域的限制对直接测量会带来困难。

CNF 方法对测量扇形束型天线最有用,如手机的基站天线,其辐射方向图大部分限制在小范围的高度上。

在 SNF 方法中,测量面的截断是非必要的,因而,其用于精确的确定任何类型的天线远处的旁瓣。因为可覆盖宽泛的角度范围,其专门用于测量近各向同性天线,如移动电话、手机的天线,以及测量天线的定向性。

总的来说,平面近场技术是测量超低副瓣天线等一系列高性能天线最为理想的测试手段。面近场测量所产生的误差进行分析,提出相应的补偿措施。因此,平面近场测量误差分析与补偿技术是平面近场技术测量超低副瓣天线能否实现的关键技术,其研究具有十分重要的实用价值[5]。对平面近场测量而言,其主要误差源有 18 项,这些误差源大致分为四类,即探头误差、测试仪表误差、环

境误差以及计算误差。这些误差源所产生的误差对大多数常规天线测量的影响几乎可以忽略不记，但对超低副瓣天线等一系列高性能天线的测量，这些误差源所产生的误差几乎每项都必须予以补偿或修正。这些补偿与修正也不断促进着近场扫描法的推广及应用。

由于近场扫描法中近场——远场变换理论中，需要近场的幅度和相位信息，而场的相位信息是难以测量，最近国内外提出近场无相测量技术，通过只测量近场扫描面的幅度分布，可直接获取场的相位信息，进而完成天线的远场特性的测量。

随着科技不断进步，天线近场测量将逐步成为天线测量最实效、便捷、精准的测量技术。