



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF xxxx—××××

天线方向性图校准规范 (球面近场扫描法)

National Specification of Antenna Pattern Calibration

(Spherical Near-field Scanning Method)

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家质量监督检验检疫总局发布

天线方向性图校准规范（球面近场扫描
法）

National Specification of Antenna Pattern Calibration
(Spherical Near-field Scanning Method)

JJF XXXX—XXXX

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：北京空间飞行器总体设计部
上海霍莱沃电子系统技术股份有限公司
中山香山微波科技有限公司
中国科学院国家空间科学中心

本规范由全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

XXX

XXX

XXX

参加起草人：

XXX

XXX

XXX

XXX

目录

目录.....	1
引言.....	1
1、范围.....	1
2、引用文件.....	1
3、术语.....	1
4、概述.....	2
5、计量特性.....	2
6、校准条件和系统配置.....	2
6.1、环境条件.....	2
6.2 测量标准设备及其他设备.....	3
6.3 射频系统配置.....	4
7 校准项目和校准方法.....	5
7.1 校准项目.....	5
7.2 校准方法.....	6
8、校准结果.....	8
附录 A 数据采集存储格式.....	1
附录 B 校准证书内页内容.....	2
附录 C 坐标系定义.....	4
附录 D 数据采样和处理.....	6
附录 D-1 数据采样率.....	6
附录 D-2 近场-远场变换.....	6
附录 D-3 远场数据处理.....	7
附录 E 探头修正.....	9
附录 F 采用球面近场扫描法测量天线方向性图的不确定度评定示例.....	10
附录 G 参考文献.....	错误!未定义书签。

引言

本规范主要依据 JJF 1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》和 JJF1059.1-2012 《测量不确定度的评定与表示》以及 IEEE Std 1720™-2012 《IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements》编写。

本规范为首次发布。

1、范围

本规范适用于采用球面近场扫描法对 1GHz~50GHz 频段的三维天线方向性图作校准。待校准天线为各种微波频段的无源天线（即不带微波信号源的天线），包括线结构天线和口面天线。50GHz 频段以上可参照该规范进行。

2、引用文件

本规范引用了以下文件：

IEEE Std 1720™-2012，IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements.

IEEE Std 149-2021 Recommended Practice for Antenna Measurements

IEEE Std 145™-2013 IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas

3、术语

3.1 方向性图 radiation pattern¹

距发射天线相位中心相同距离处所辐射电磁场的相对强度与方向之间的变化关系。可用图形、数学函数或表格等形式来表示，通常与功率密度、辐射强度或场强成正比；沿任何曲面和路径的空间分布特性也可称之为天线方向性图。方向性图包含幅度方向性图和相位方向性图，当未特别说明默认指幅度方向性图。

[IEEE Std 145™-2013，第 4 节，第 30 页]；

[CISPR 16-1-6 Edition 1.2 2022-03 术语 3.1.1.15]

[GB/T 6113.106-2018/CISPR 16-1-5:2014 术语 3.1.1.15]

3.2 主 E-面 principal E-plane

线极化天线辐射的电场矢量和最大辐射方向所构成的平面。

[CISPR 16-1-6 Edition 1.2 2022-03 术语 3.1.1.16]

[GB/T 6113.106-2018/CISPR 16-1-5:2014 术语 3.1.1.16]

3.3 主 H-面 principal H-plane

线极化天线的磁场矢量和最大辐射方向构成的平面。

[CISPR 16-1-6 Edition 1.2 2022-03 术语 3.1.1.17]

[GB/T 6113.106-2018/CISPR 16-1-5:2014 术语 3.1.1.17]

3.4 待测天线最小球面 minimum sphere of AUT

¹ 本校准规范针对无源天线，因此 AUT 即可作为发射天线也可作为接收天线，具体取决于现场硬件配置情况。

球心位于实验室坐标系原点且完全包围 AUT 的最小几何球面，半径用 r_0 表示。

[IEEE Std 1720:2012, 42 页]

3.5 探头最小球面 probe minimum sphere

能够包围探头的最小几何球面，半径用 r'_0 表示。

[IEEE Std 1720:2012, 44 页]

4、概述

天线是导行波和空间电磁波之间的转换器，这里特指不含微波信号源的各种天线，包含全向性天线和定向性天线。天线的辐射方向性图用于表征天线辐射的电磁场在空间的分布特性的参数，广泛用于通信、遥感、航空、航天、国防以及电磁兼容等领域。

球面近场法可测量各种无源天线，尤其适用于测量微波频段的宽波束天线。与远场法相比，球面近场法测量的副瓣电平和零深更为准确。

5、计量特性

依照本校准规范，能够测量的三维天线方向性图的电平如如表 1 所示：

表 1：辐射方向性图（幅度）

天线类型	频率范围 GHz	相对于主瓣峰值的电平 dB
线结构类天线	1 ~ 26.5	-30 ~ 0
面结构类天线	1 ~ 50	-40 ~ 0

6、校准条件和系统配置

6.1、环境条件

环境温度：23℃±5℃（校准期间温度变化范围）；

相对湿度：20%~70%；

电源要求：220 × (1±10%)V、(50±1)Hz；

周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 测量标准设备及其他设备

6.2.1 电波暗室

暗室静区尺寸应能够容纳待测天线及相关测试设备，是待测天线及相关测试设备最外延距离。暗室静区反射率电平满足表 2 的要求。

表 2: 暗室静区反射率电平

频率 GHz	1	5	10	50
反射率电平 dB	≤ -20	≤ -30	≤ -40	≤ -40

6.2.2 球面近场扫描架及控制单元

有多种类型。常见方式为上极化下方位扫描架，如图 1 所示。其中方位轴应垂直于水平面，垂直度允差为 $\pm 0.05^\circ$ ；极化轴与方位轴垂直允差为 $\pm 0.05^\circ$ ；方位轴与极化轴应交于一点，交点偏离允差为 $\pm 0.04\text{mm}$ ；角度分辨率优于 0.05° 。

探头定位器：有效旋转角度范围为 $0\sim 180^\circ$ ，角度分辨率小于 0.05° 。

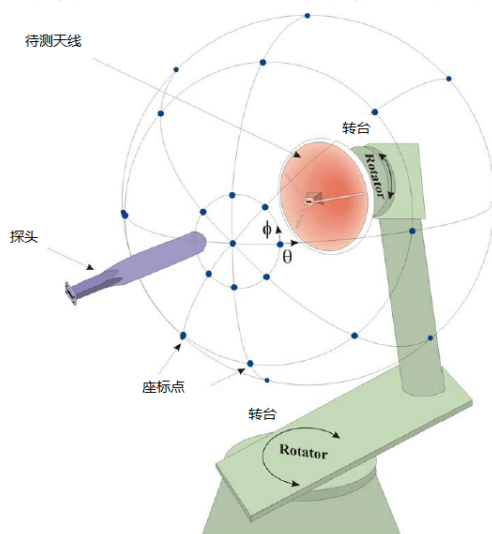


图 1 上极化-下方位形式的扫描架

6.2.3 射频系统及微波附件

推荐采用以下配置方式，也可采用矢量网络分析仪直连方式，即不采用外混频方式。

包括信号源、混频器、本振中频分配单元、中频接收机或矢量网络分析仪、旋转关节以及射频电缆等，具体为：

a) 信号源

频率：(1~50) GHz

输出功率：(-110 ~ 10) dBm;

频率分辨率 (CW): $< 0.01\text{Hz}$

b) 混频器

表 3 混频器及其变频损耗

本振频率 GHz	典型变频损耗 dB	混频谐波次数
2 ~ 18	12	1
18 ~ 50	28	6-8

c) 微波矢量网络分析仪及配套校准件

覆盖频率范围: 1 GHz~50 GHz

传输系数 S21 测量的不确定度: 幅度不确定度 $< 0.1\text{ dB}$ ($|S21| < 50\text{ dB}$)、相位不确定度: $< 1^\circ$ ($|S21| < 50\text{ dB}$)。

准备配套矢量网络分析仪的校准件套装。通常需要 N 型精密校准件套装、3.5mm 校准件套装, 以及波导校准件套装。具体的波导校准件种类, 需要根据测量需求而定。

d) 旋转关节

频率范围 DC ~ 18 GHz

VSWR < 1.5

插入损耗 $< 0.5\text{ dB}$

幅度跳动范围 $< 0.05\text{ dB}$

相位跳动范围 $< 1.0^\circ$

可承受的连续波功率 $> 1\text{ W}$

6.2.4 近场扫描探头

常用近场扫描探头是工作于基模 TE_{10} 的矩形开口波导、双极化波导 (如圆形开口波导)。采用超宽带近场扫描探头时, 需要注意探头覆盖的吸波材料以及探头方向性图的修正。所用探头的频率范围能够覆盖方向性图测量所需频率。

双极化探头的交叉极化比小于 -25dB (轴向);

探头的电压驻波比 $\text{VSWR} < 5$ 。

6.3 射频系统配置

有两种基本的射频系统配置方式, 分别为矢量网络分析仪直连方式 (见图 2) 和外混频方式 (见图 3)。直连方式最简单, 方便进行全-2 端口校准。但是在高频段 (如 40GHz 以上) 的线缆损耗较大, 因此直连方式通常只用于小型测量系统。在大型测量系统中所需射频线缆较长, 因此一般需要采用外混频方式来降低射频线缆的射频信号损耗。

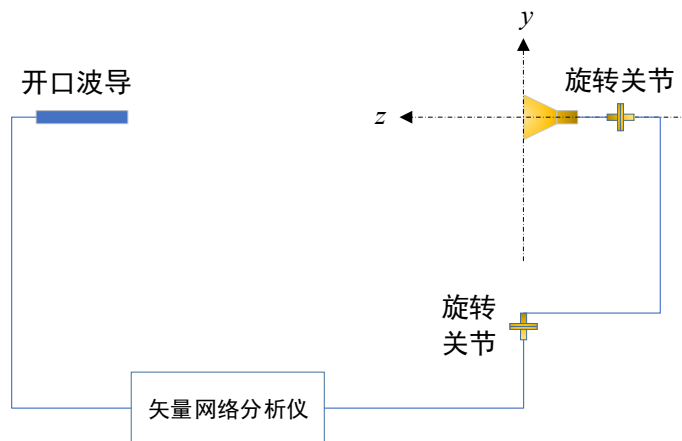


图 2 矢量网络分析仪直连方式

采用外混频方式，核心是缩短射频源与 AUT 之间的距离，把射频信号经过外混频以后，变成中频信号 IF 进入矢量网络分析仪接收机。微波信号源既可布安装于近场探头后侧（见图 3 所示），也可安装于 AUT 后侧。当把微波信号源放置于 AUT 后侧时，需要

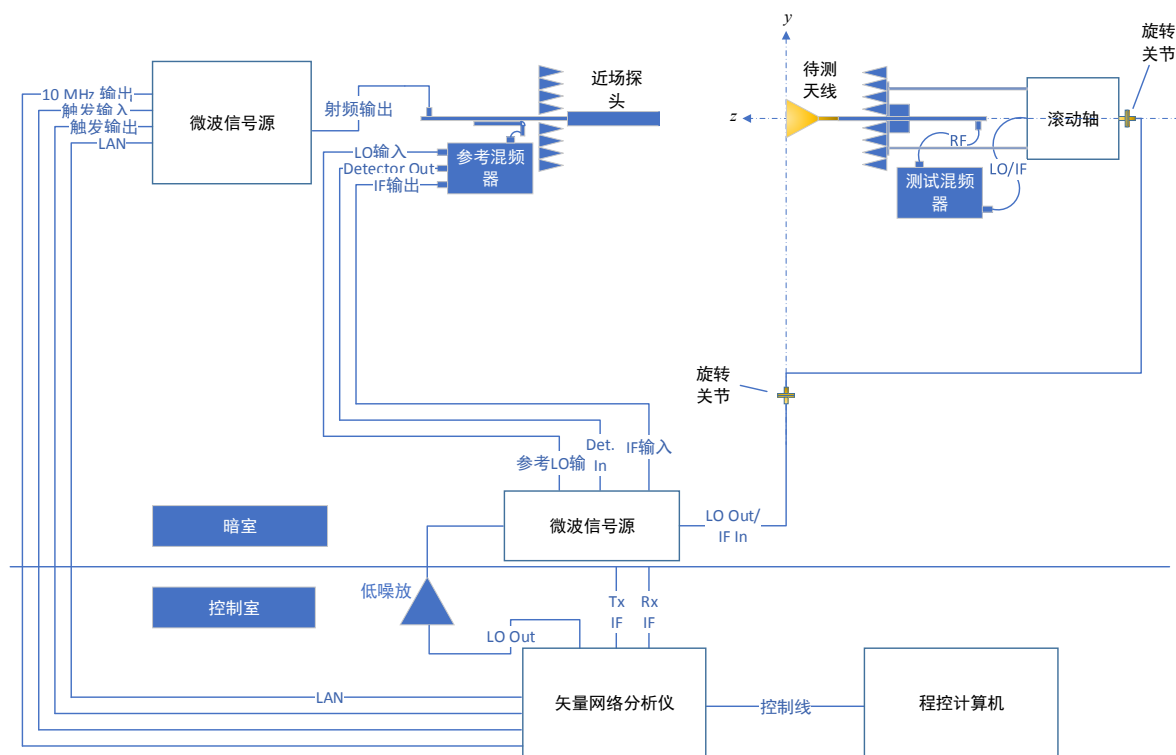


图 3 外混频连接方式

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

归一化天线辐射方向性图

7.2 校准方法

采用球面近场扫描法（SNF）来校准天线方向性图。校准过程简述于下。

7.2.1 外观功能性检查

对待测天线（AUT）的外观进行检查，如天线外形有无变形，射频接头是否正常，射频接头的类型与现有测量系统的连接器是否匹配，AUT 如何安装和对准等，做好相应准备。与客户沟通确定好待测频率。

7.2.2 校准前的准备工作

测量 AUT 的端口电压驻波比 VSWR，当测量结果与其典型值比相差很大（如超过 30% 以上）时，需要与天线厂家或用户沟通，是否需要采取相应措施。

确定好实验室坐标系 (x, y, z) 和探头坐标系上 (x'', y'', z'') 。一种推荐的坐标系设置方式详见附录 C。根据待测天线的特性和习惯，确定好 AUT 的坐标系 (x', y', z') ，准确、清晰地确定坐标系对于测量结果的准确记录和出具证书都是非常重要的。

7.2.3 安装探头和待测天线

在安装 AUT 时，应尽量让 AUT 的坐标系 (x', y', z') 与实验室坐标系 (x, y, z) 重合，如图 4 所示。

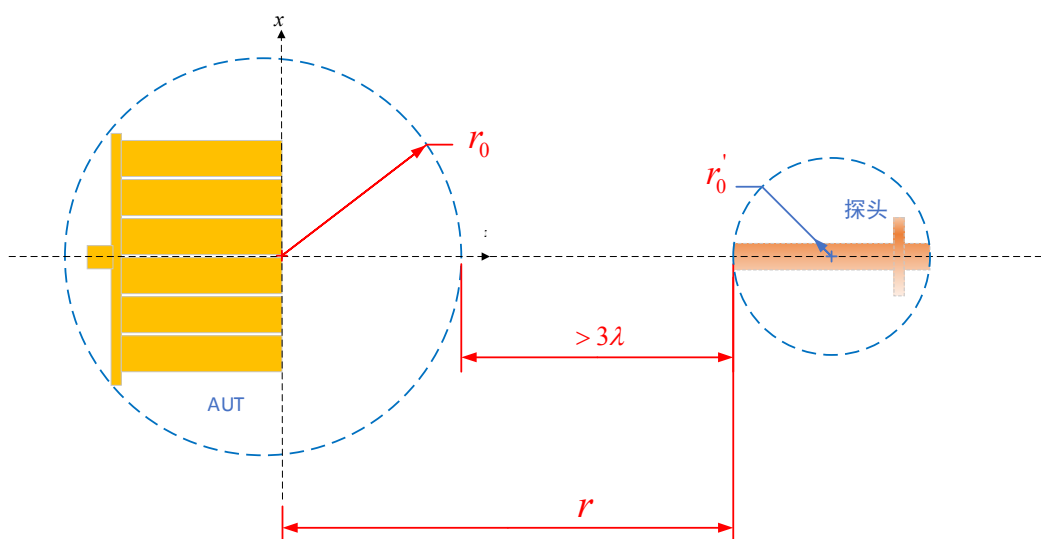


图 4 待测天线和探头的对准及坐标系示意图（AUT 坐标线与实验室坐标系重合）

根据待校准天线类型和频段，选择相应探头。一种常见的探头安装方式为：探头的 z' 轴需与实验室坐标系 z 轴共线（ z' 轴与 z 的偏离距离小于最短波长的 $1/75$ ），这里 y' 轴竖直向上（垂直度误差小于 0.05° ）。

球面近场扫描半径设定为 r 。在安装 AUT 时，应使得探头最小球面与待测天线最小球面相隔距离大于三倍波长（ λ ），见图 4 所示。简单而言，球面近场扫描半径 $r > r_0 + r_0' + 3\lambda_{\max}$ ，其中 λ_{\max} 为最低测量频率对应的波长。

7.2.4 设置仪器的功能参数

根据方向性图测试要求，设置中频接收机或矢量网络分析仪的中频带宽、频率、外混频参数以及信号源频率和输出功率等参数，确保测量主瓣时射频系统电平不饱和（波动小于 0.02dB ），旁瓣时射频系统的信噪比满足要求（波动小于 0.1dB ）。

7.2.5 数据采集

调整极化轴和方位轴控制器，在相应角度范围内，采集每一个 (r, θ, ϕ) 位置对应的频率、传输系数幅度和相位 $w(r, \chi, \theta, \phi)$ 等数据，可依照附录 A 所示（或其转置）作数据处理；这里 (r, θ, ϕ) 为球坐标， χ 为探头旋转角度。数据采样率 N 可由事先写好的程序自动计算，具体计算方法详见附录 D.1。

7.2.6 近场-远场变换

利用球面近场天线测量采集到的数据 w ，可通过附录 D.2 所示近场-远场变换式（D-5），得到待测天线的传输系数 T_{smn} ，详见参考文献[1][4]。可实现写好球面近场-远场变换程序进行自动进行变换。

7.2.7 远场数据处理

根据得到的待测天线的传输系数 T_{smn} ，利用附录 D.3 所示式（D-7）得到远场方向性图 W' 。此即为测量结果。通常为了方便出证书，通常需要给出 E-面方向和 H-面方向图。

8、校准结果

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点(如果与实验室的地址不同)；
- d) 证书的唯一性标识(如编号)，每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

附录 A 数据采集存储格式

附表 A-1：数据存储格式

推荐采用 excel 表格存储数据，如表 A-1 所示；如果采用 txt 文件存储数据，可编写一个数据格式转换程序把 txt 文件转换为表 A-1 所示格式。

扫描半径：_____ mm

记录待测天线的型号/系列号以及送检客户有关信息

表 A-1，

$f = \underline{\text{xxx}}$ MHz				
$\mu = 1$ (或 $\mu = -1$)	ϕ_1	ϕ_2	...	ϕ_M
θ_1				
...				
θ_N				

附录 B 校准证书内页内容

B.1 名词解释：

本证书中的方向性图辐射方向性图定义为“用于表征天线辐射的电磁场在空间的分布特征”，其幅度用分贝（dB）来表示，并归一化到主瓣峰值，即方向性图幅度最大电平为 0dB。

B.2 校准方法说明

本方法采用上极化下方位球面近场扫描方式校准。其中探头（型号及系列号）作为发射天线，待测天线（型号及系列号）作为接收天线。待测天线和探头的安装方式如图 B.1 和图 B.2 所示。

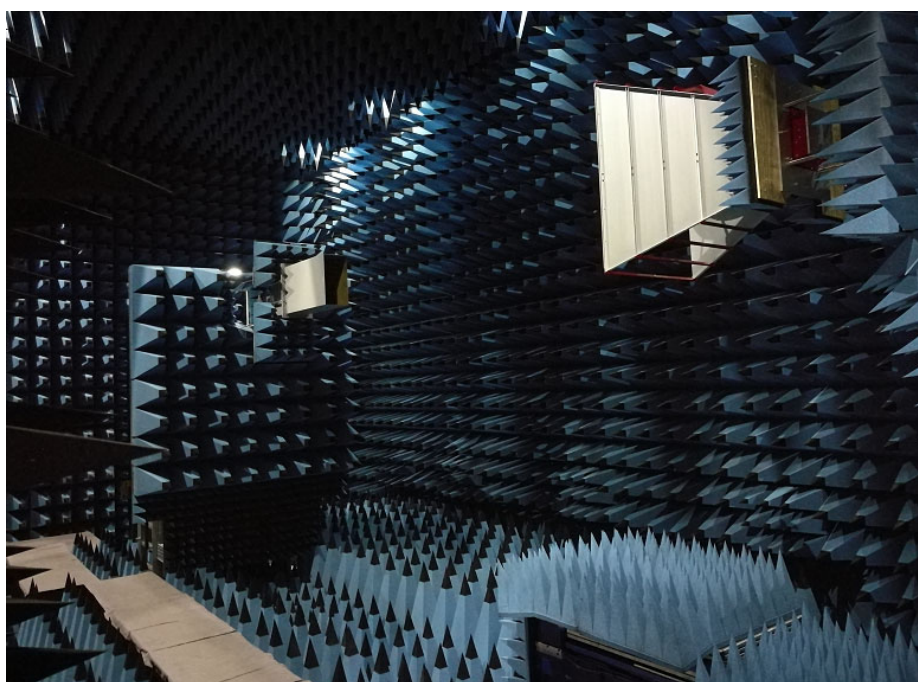


图 B.1 待测天线和近场扫描探头安装实物照片

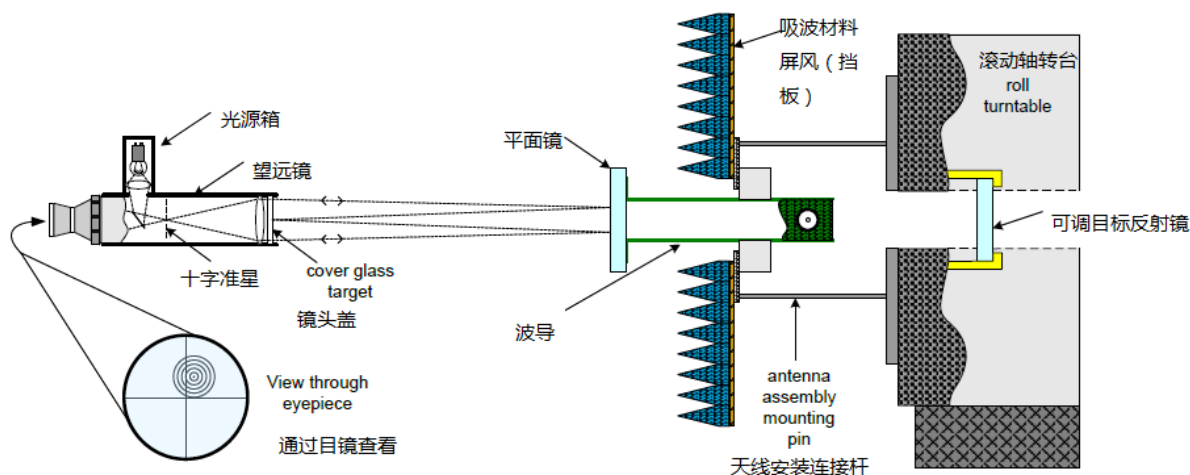


图 B.2 借助于准直仪精细对准和调节待测天线 AUT 以及近场扫描探头

B.3 待测天线与遮挡吸波材料简介

待测天线不含同轴-波导转换部分，通过法兰盘连接到实验室配套的同轴-波导转换器，型号为_____。可借助于测微准直望远镜，通过卡具微调，确保待测天线口面与实验室 z 轴垂直。探头的 z 轴对准球面近场扫描中心。

B.4 校准结果说明

校准得到的远场方向性图，可通过极坐标或直角坐标系来表示 E 面方向性图、H 面方向性图和其他重要切面方向性图（示例见图 B.3~ B.5），也可通过三维方向性图来展示(示例如图 B.6 所示)。校准不确定度如表 B.1 所示。

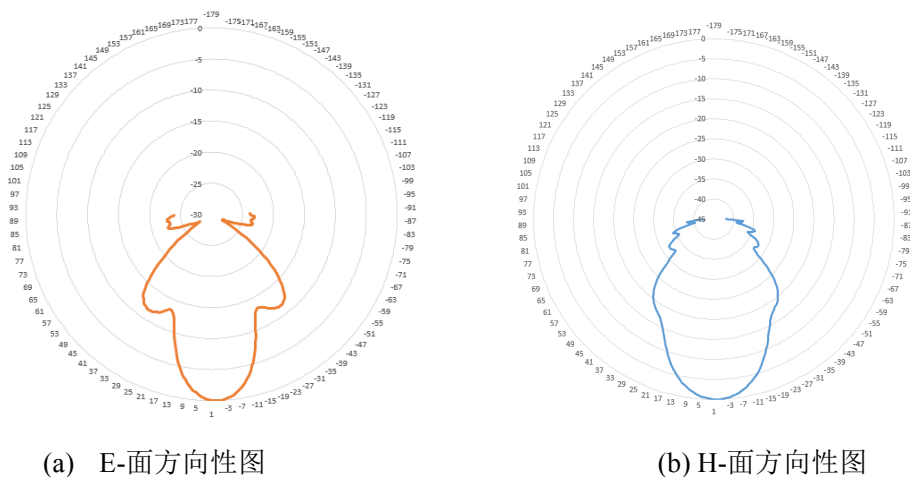


图 B.3 极坐标表示的方向性图 (40 GHz)

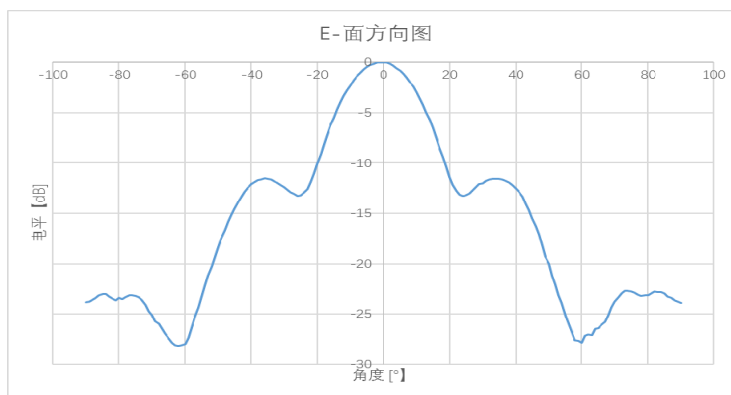


图 B.4 直角坐标表示的 E-面方向性图 (40 GHz) 示例

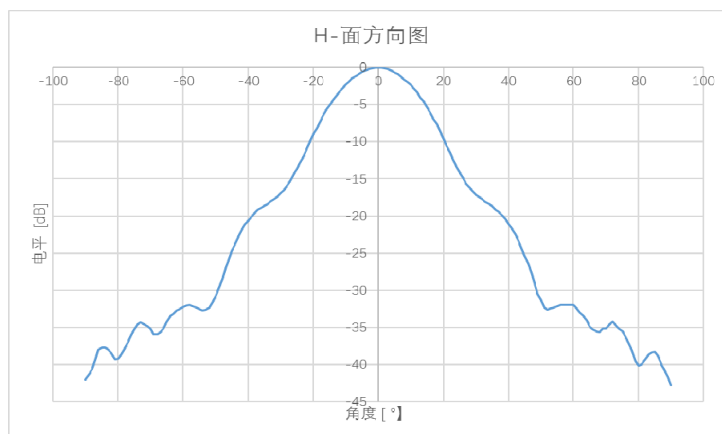


图 B.5 直角坐标表示的 H-面方向性图 (40 GHz)

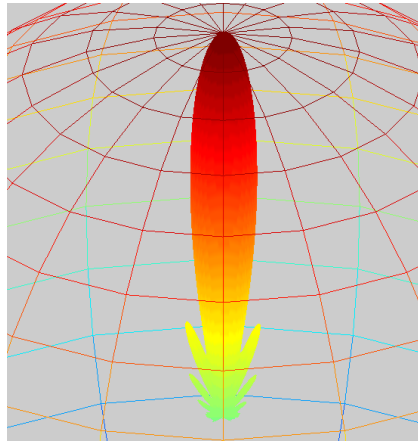


图 B.6 三维方向性图

表 B.1 校准不确定度：

相对于主瓣的电平 [dB]	扩展不确定度 ($k=2$) [dB]
0	0.3
-10	0.5
-20	1.0
-30	3.0

附录 C 坐标系定义

球面扫描坐标系

对于上极化下方位扫描架而言， y 轴垂直于水平面，并向上； z 轴水平，并指向探头， x 轴由右手坐标系来确定；坐标系原点位于球面扫描的圆心。球面近场扫描的空间坐标用 (x, y, z) 或 (r, φ, θ) 表示。球面扫描坐标系也可称为实验室坐标系，见图 C-1。

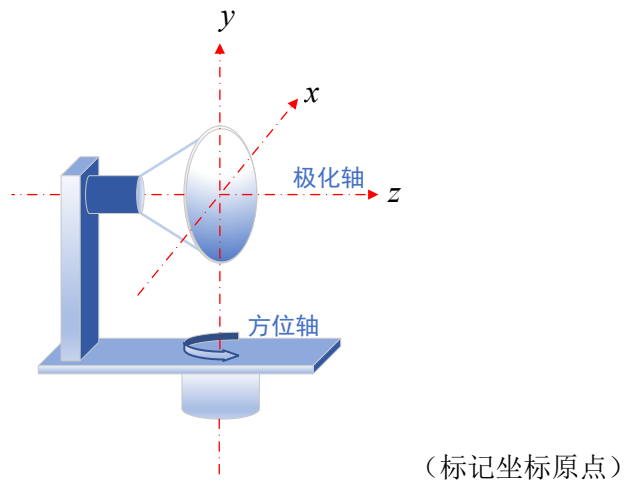


图 C-1 球面扫描坐标系（实验室坐标系）

待测天线坐标系

待测天线的坐标系用 (x', y', z') 表示。对于待测喇叭天线而言， x', y' 平面与天线口面重合，坐标系原点位于口面中心； z' 轴垂直于口面并指向探头。对于其他天线，可按天线厂商约定方式或与天线用户共同商定。

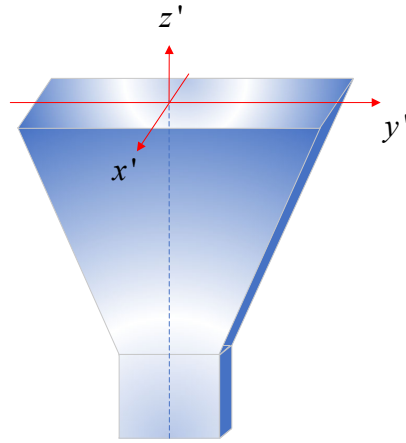


图 C-2 AUT 坐标系 (x', y', z')

探头坐标系：

探头的坐标系用 (x'', y'', z'') 表示，如图 C-3 所示。对于矩形开口波导探头而言， x'', y'' 平面与口面重合，坐标系原点位于口面中心； z'' 轴垂直于口面并指向 AUT。对于其他探头，可按照类似方式进行设定，目的是为了便于原始记录和出具证书。

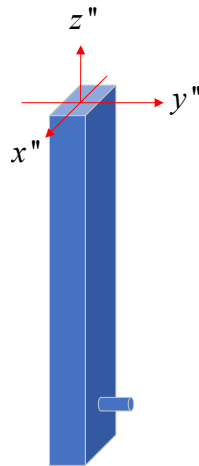


图 C-3 近场扫描探头的坐标系 (x'', y'', z'')

附录 D 数据采样和处理

附录 D-1 数据采样率

设球坐标系为 (r, θ, ϕ) ， χ 为探头绕视轴（即 z 轴）的旋转角度。

数据采样的极化角扫描间隔 $\Delta\theta$ 由式（D-1）计算。

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{2N+1} \approx \frac{\pi}{N} (N \gg 1) \quad (\text{D-1})$$

整数 N 由式（D-2）计算：

$$N = [kr_0] + n_2 \quad (\text{D-2})$$

$[kr_0]$ 表示对 kr_0 取整，波数 $k = 2\pi/\lambda$ ， λ 为波长，单位为 m ， r_0 为待测天线AUT的最小球半径，单位 m 。

n_2 由式（D-3）计算

$$n_2 = \max\left(\left[A \cdot \sqrt[3]{kr_0}\right], 10\right) \quad (\text{D-3})$$

这里 A 是一个经验值，取决于所需测量精度。对于小口径天线， n_2 最小值可取为10；当相对电平小于-80dB时， $A = 3.6$ ；相对电平小于-100dB时， $A = 5$ 。

方位角扫描间隔 $\Delta\phi$ 的要求与 $\Delta\theta$ 相同；但当包含待测天线并与 z 轴平行的圆柱的半径 r_c 满足条件 $r_c < r_0$ 时，可由下式来计算方位角扫描间隔 $\Delta\phi$ ：

$$\Delta\phi \approx \frac{\pi}{M}, (M \gg 1) \quad (\text{D-4})$$

式中：

$$M \approx [kr_c] + n_2。$$

附录 D-2 近场-远场变换

设球面近场天线测量采集到的数据为 w 。可通过求解近场-远场变换式（D-5），得到待测天线的传输系数 T_{smn} ，详见附录G所示参考文献[1~4]。

$$w(A, \chi, \theta, \phi) = \sum_{smn\mu} T_{smn} e^{im\phi} d_{\mu m}^n(\theta) e^{i\mu\chi} P_{s\mu n}(kA) \quad (\text{D-5})$$

式中：

w ——球面近场采集到的传输系数；

(θ, ϕ) ——球面扫描坐标系中的极角 (polar angle) 和方位角 (azimuth angle), 单位均为 rad;

A ——扫描半径 (即 $z = A$, 球面扫描半径), m;

χ ——探头的极化角, $\chi = 0, \pi/2$, 弧度 Rad;

$e^{im\phi} d_{\mu m}^n(\theta) e^{i\mu z}$ ——球面波函数的旋转系数;

m 为方位角上的模式;

$d_{\mu m}^n(\theta)$: m, μ, θ 各自含义。

$\mu = \pm 1$: 探头的模式

$P_{s\mu n}(kA)$ ——探头响应常数, 可通过式 (D-6) 计算。

$$P_{s\mu n}(kA) = \frac{1}{2} \sum_{\sigma\nu} C_{\sigma\mu\nu}^{sn}(kA) R_{\sigma\mu\nu}^p \quad (\text{D-6})$$

式中:

$C_{\sigma\mu\nu}^{sn}(kA)$ ——球面波的坐标平移系数;

$R_{\sigma\mu\nu}^p$ 为探头的接收系数 (探头修正数据的校准方法见附录 D); 对于旋转对称性探头

或 A 较大时, 有 $\mu = \pm 1$; $\sigma = 1, 2$; $\nu = |\mu|$ 。

m 和 n 对应于 m 阶 n 次连带勒让德函数 $P_n^m(\cos\theta)$, $m = -N, \dots, 0, \dots, N$,

$n = |m|, \dots, N (n \neq 0)$ 。

$s = 1, 2$ 。

对于横磁波 TM, 磁场正比于 $s=1$ 的分量, 电场正比于 $s=2$ 的分量;

对于横电波 TE, 电场正比于 $s=1$ 的分量, 磁场正比于 $s=2$ 的分量。

求和符号中的希腊字母角标 (σ, μ, ν) 对应于探头; 拉丁字母角标 (s, m, n) 对应于待测天线。

附录 D-3 远场数据处理

根据得到的待测天线的传输系数 T_{smn} , 利用式 (D-7) 得到远场方向性图 W' 。

$$W'(\chi, \theta, \phi) = \sum_{\substack{smn \\ \mu=\pm 1}} T_{smn} e^{im\phi} d_{\mu m}^n(\theta) e^{i\mu z} P_{s\mu n}' \quad (\text{D-7})$$

式中

$$P'_{s1n} = -\frac{\sqrt{6}}{8} \sqrt{2n+1} i^{-n} \quad (\text{D-8})$$

$$P'_{s-1n} = (-)^s \frac{\sqrt{6}}{8} \sqrt{2n+1} i^{-n} \quad (\text{D-9})$$

对于 $W'(\chi, \theta, \phi)$ ，可通过适当的内插来增加分辨率。然后再归一化到最大值，即：

$$\bar{W}'_{\text{Amp}}(\theta, \phi) = W'_{\text{Amp}}(\theta, \phi) / W'_0 \quad (\text{D-10})$$

式中：

$$W'_{\text{Amp}}(\theta, \phi) = \sqrt{\left| W'(\chi=0, \theta, \phi) \right|^2 + \left| W'\left(\chi=\frac{\pi}{2}, \theta, \phi\right) \right|^2} \quad (\text{D-11})$$

$$W'_0 = \max\{W'_{\text{Amp}}(\theta, \phi)\} \quad (\text{D-12})$$

附录 E 探头修正

球面近场扫描中对于方位角旋转对称性探头，可只考虑球面波模式 $\mu = \pm 1$ 的情况。完整的探头修正包括极化修正、方向性图修正和增益修正。对于这种探头的完整方向性图 $\overset{\circ}{K}(\theta, \phi)$ ，可通过共极化下的 E 面方向性图 $f_1(\theta) = K_\theta(\theta, 0)$ 、H 面方向性图 $f_2(\theta) = -K_\theta(\theta, \pi/2)$ 和极化比 $p = E_y/E_x$ 来确定（假定电场极化方向为 x 轴，探头坐标系见附录 C），如式 (D-1) 所示。

$$\overset{\circ}{K}(\theta, \phi) = \{f_1(\theta)\overset{\circ}{e}_\theta + pf_2(\theta)\overset{\circ}{e}_\phi\} \cos \phi + \{pf_1(\theta)\overset{\circ}{e}_\theta - f_2(\theta)\overset{\circ}{e}_\phi\} \sin \phi \quad (\text{E-1})$$

式中 $\overset{\circ}{e}_\theta$ 和 $\overset{\circ}{e}_\phi$ 分别为 θ 轴和 ϕ 轴的单位矢量。

具体而言，有三种基本方式：

方式 1：当探头较小，或 A 较大时，可以用偶极子天线来做近似，偶极子天线的方向性图见式 (8) 和 (9)；

方式 2：采用仿真方式；

方式 3：对近场扫描探头进行精密校准。

探头的增益可以使用三天线外推法进行准确校准。极化校准，也可采用外推法硬件装置进行校准。探头的 E 面和 H 面辐射方向性图可以采用远场方法进行校准。

附录 F 采用球面近场扫描法测量天线方向性图的不确定度评定示例

球面近场扫描中的近场-远场变换理论是严格的，仅忽略了探头与待测天线间的多重反射。此外，满足采样定律的 FFT 变换数值计算的误差远小于测量误差，因此这里理论模型误差和数值计算引起的误差均忽略不计。

F.1 待测量

这里的待测量为采用上极化下方位球面近场扫描法得到的近场数据根据球面近场-远场变换理论得到的远场方向性图。

F.2 不确定度模型

由于球面近场-远场变换的理论（式 5）过于复杂，而且数据量大，因此很难采用偏微分方式来做评估方向性图。为此，待测量 $f(\mathbf{x})$ 可采用“自我比较法” [1] 来做评估，如式 (E-1) 所示。

$$\Delta f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_N) - f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N) \quad (\text{F-1})$$

这里，向量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N)$ 表示天线方向性图的影响量；

Δx_i 表示在影响量 x_i 中引入的误差项。

可综合应用计算机仿真、数值计算和试验等方法来评估。需要说明，在实验过程中，把某一影响量 x_i 改变了 Δx_i 时，其他影响量也可能会发生变化，导致式 (F-1) 变成式 (F-2)

$$\Delta f(\Delta x_i) \approx f(x_1 + \Delta x_1', x_2 + \Delta x_2', \dots, x_i + \Delta x_i', \dots, x_N + \Delta x_N') - f(x_1 + \Delta x_1', x_2 + \Delta x_2', \dots, x_i + \Delta x_i' + \Delta x_i, \dots, x_N + \Delta x_N'). \quad (\text{F-2})$$

为了正确评估 $f(\mathbf{x})$ 对改变量 Δx_i 的影响量 $\Delta f(\Delta x_i)$ ，需要确保 $\Delta x_i'$ 足够小。

F.3 不确定度汇总表

由于采用暗箱模型，因此灵敏度系数 c_i 全为 1。

表 E-1 方向性图测量不确定度汇总表示例（幅度，-30 dB）

序号	不确定度类型	不确定度来源	26 GHz	33 GHz	40 GHz	概率分布	包含因子
1	探头	探头方向性图	0.06	0.05	0.03	矩形	1
2		探头极化比	—	—	—	矩形	1
3	安装对准、扫描架精度	探头对准	0.20	0.60	0.30	矩形	1
4		AUT 对准	0.06	0.10	0.10	矩形	1
5		扫描半径误差	0.10	0.10	0.10	矩形	1
6		扫描架的遮挡效应	0.20	0.20	0.20	矩形	1
7		采样面截断误差				矩形	1
8		采样间隔	0.70	0.90	0.80	矩形	1
9	吸波材料	探头与 AUT 间多重反射	0.20	0.30	0.25	正态	1
10		暗室散射	0.60	0.70	0.30	正态	1
11	失配	探头失配	—	—	—	正态	1
12		AUT 失配	—	—	—	正态	1
13	射频系统引起幅相	电缆/旋转关节	0.20	0.10	0.30	矩形	1
14		温度变化				U 型	1
15		接收机幅度非线性				矩形	1
16		接收机动态范围				矩形	1
17		泄露和串扰				0.10	0.05
18	随机	随机误差	0.10	0.12	0.15	正态	1
合成标准不确定度			1.02	1.36	1.03	正态	2
扩展不确定度			2.0	2.7	2.1	正态	2

说明：完整的天线方向性图测量不确定度评定报告过长，故作为单独的文件。

F.4 测量不确定度的验证

通常测量不确定度有一套科学的评估方法，包括 A 类评估方法和 B 类评估方法。但鉴于球面近场法过于复杂，有必要采用多种方法来验证所评定的不确定度的可靠程度。图 F-1 ~E-3 分别展示了与远场法的比较、与矩量法的比较以及与不同测量装置进行的比较。其中图 F-3 的方法要确保参加比较的装置要足够精确。

分别采用球面近场方法和远场方法测量同一个标准增益喇叭天线得到的远场方向性图，如图 F-1 所示。

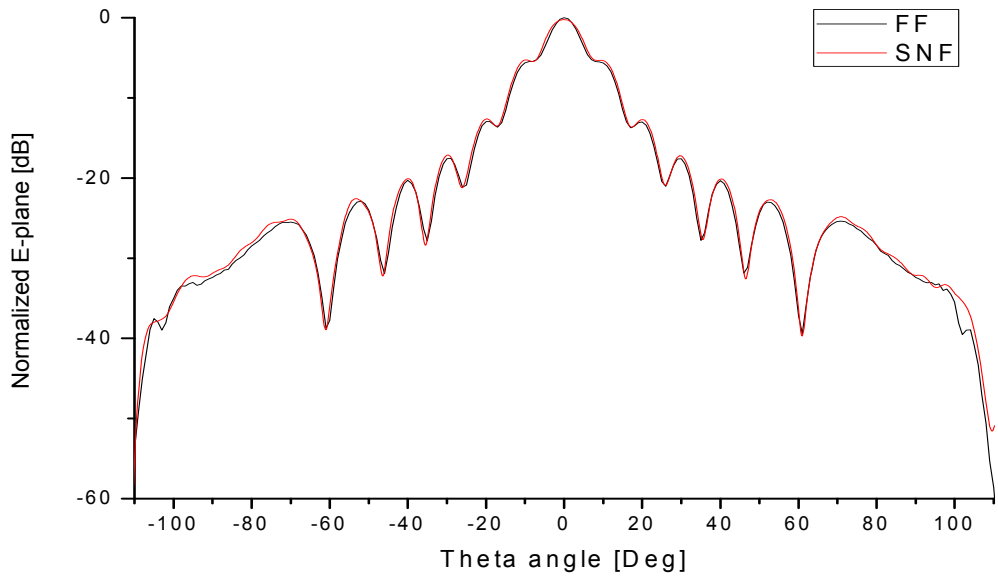


图 F-1 采用球面近场法和远场法测量同一个标准增益喇叭天线得到的远场 E-面方向性图比较 (110GHz)

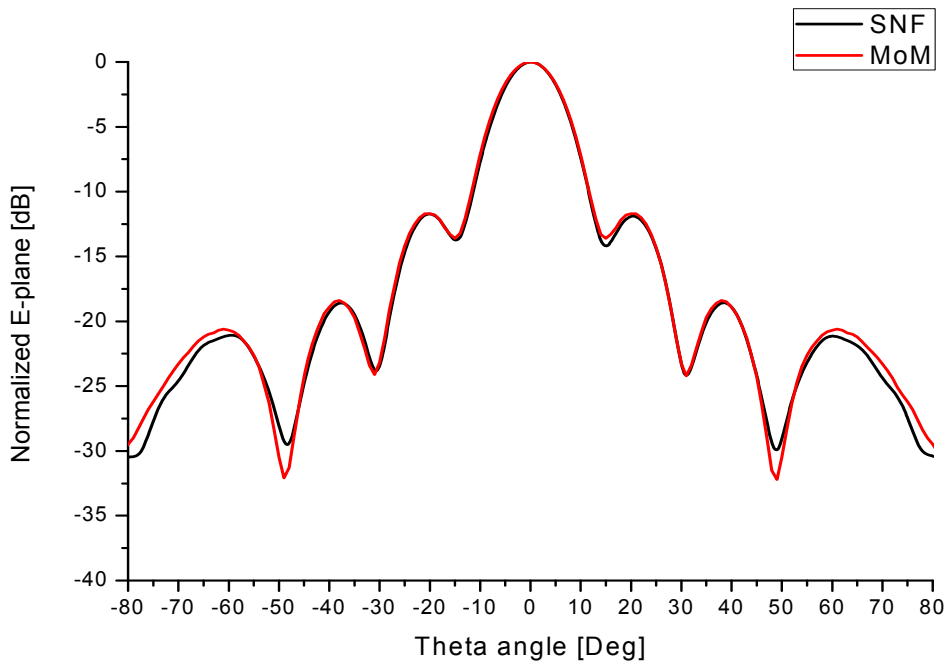


图 F-2 采用球面近场方法和矩量法仿真得到的标准增益喇叭天线的 E 面方向性图比较 (3.95 GHz)

针对同一个喇叭天线,分别采用本项目研制的球面近场系统以及采用北京空间飞行器总体设计部 (BISSE)的系统做测量或数据分析,得到的结果如图 F-3 所示。

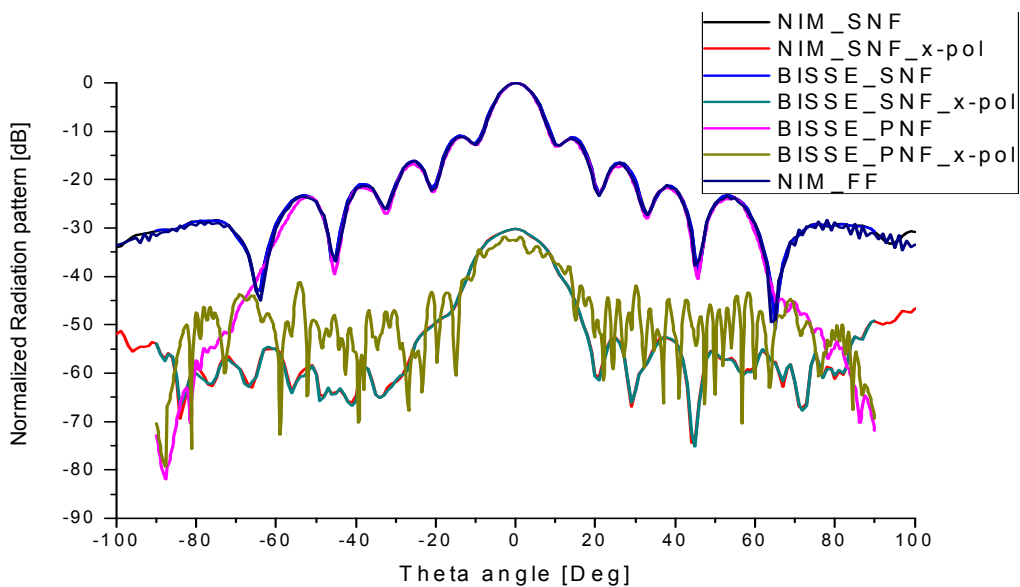


图 F-3 天线方向性图测量结果比较 (E-面, 33 GHz)

图例说明:

NIM_SNF: 采用中国计量院 (NIM) 研制的球面近场系统得到的远场方向性图;

BISSE_SNF 根据 NIM 采集的数据, 由 BISSE 采用球面近场-远场变换得到的远场方向性图;

BISSE_PNF: 由 BISSE 采用平面近场系统测试得到的同一个喇叭天线的远场方向性图;

NIM_FF: 由 NIM 采用远场测量方法得到的方向性图。