ICS 35.240.01
CCS L 70

T/CS

团 体 标 准

T/CS 334—2026

全数字相控阵天线阵面系统规范

System specification for fully digital phased array antenna array face

2026－06－12 发布 2026－06－12 实施

中国商品学会 发 布

目　　次

前言 II
1　范围 1
2　规范性引 用文件 1
3　术语和定义 1
4　缩略语 2
5　系统组成 2
6　技术要求 3
7　试验方法 4
8　验收与运维 6
附录 A（规范性）　主要指标和功能测试方法 8

前　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由成都雷尼尔科技有限公司提出。

本文件由中国商品学会归口。

本文件起草单位：成都雷尼尔科技有限公司、成都秀为科技发展有限公司、菲比斯微波技术成都有限公司。

本文件主要起草人：陈俊、张崇谦、钟秋和。

全数字相控阵天线阵面系统规范

1 范围

本文件规定了全数字相控阵天线阵面系统的缩略语，描述了系统组成、技术要求、验收标准、运维方案及相应的试验方法。

本文件适用于全数字相控阵天线阵面系统（以下简称“系统”）。

2 规范性引 用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2423.1—2008 电工电子产品环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 A：低温

GB/T 2423.2—2008 电工电子产品环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 B：高温

GB/T 2423.3—2016 环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 Cab：恒定湿热试验

GB/T 5080.1 可靠性试验 第 1 部分：试验条件和统计检验原理

GB/T 5080.7 设备可靠性试验 恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方案

GB/T 17626.2—2018 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验

GB/T 17626.3—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第 3 部分：射频电磁场辐射抗扰度试验

GB/T 17626.4—2018 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

GB/T 17626.5—2019 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验

GB/T 28827.1 信息技术服务 运行维护 第 1 部分：通用要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

全数字相控阵天线阵面系统 fully digital phased array antenna array face system

由多个天线单元组成的子阵系统，每个单元配备独立的数字收发通道，通过数字波束成形技术在数字域实现波束的实时形成、控制与捷变。

3.2

数字子阵模块 digital subarray module

由子阵天线、多通道接收组件、数字处理组件等构成的完整多通道接收与处理单元，是构成相控阵阵面的基本功能模块。

3.3

主控单元 main control unit

为各数字子阵模块提供时频信号、同步控制、参数配置与状态管理，并汇聚处理各子阵波束数据的核心硬件单元。

3.4

通道间幅度差异 inter-channel amplitude difference

在同一工作条件下，系统内不同接收通道之间，对于相同输入信号的幅度响应之差。

3.5

通道间相位差异 inter-channel phase difference

在同一工作条件下，系统内不同接收通道之间，对于相同输入信号的相位响应之差。

3.6

关联性故障 relevant failure

导致系统某项基本功能丧失或主要技术指标下降至不满足本文件规定要求的故障。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AD：模拟-数字转换（Analog-to-Digital）

CPU：中央处理器（Central Processing Unit）

DBF：数字波束形成（Digital Beam Forming）

FPGA：现场可编程门子阵（Field-Programmable Gate Array）

5 系统组成

5.1 组成结构

系统由硬件和软件两部分组成。硬件部分包括 1 个主控单元和多个数字子阵模块；软件包括子阵控制与预处理软件、DBF主控处理软件、天线控制软件。系统硬件组成结构见图 1。

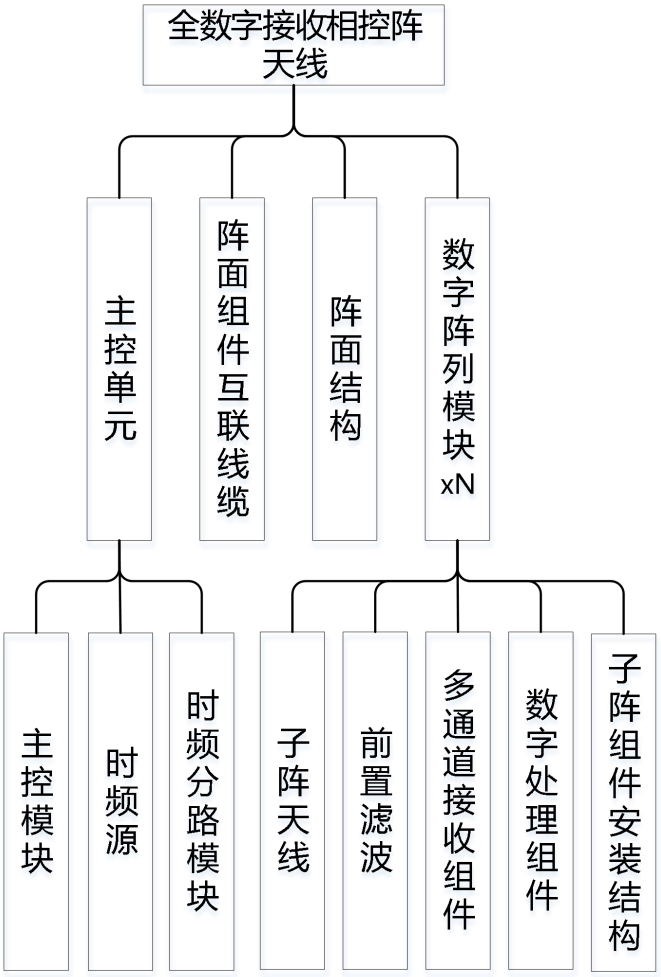


图 1 硬件组成结构图

5.2 各部分要求

5.2.1 主控单元

主控单元在物理上应集成为独立的机箱或模块，包括 1 个主控模块、1 个时频源信号 1 个分路模块和时频源模块。具备下列功能：

a) 为每个数字子阵模块提供时频信号、同步控制、参数配置和状态管理；

b) 通过网络与上层计算机控制系统进行交互，接收系统指令并上报状态信息，实现状态监控功能；

c） 产生子阵所需的时钟、同步脉冲、接收本振以及标校射频；
d） 接收来自各数字子阵模块的波束数据，进行全阵 DBF 处理；
e） 将处理结果送往后端基带处理设备。

5.2.2 数字子阵模块

每个数字子阵模块是一个完整的多通道接收与处理单元，N 个模块共同构成完整的相控阵阵面。每个数字子阵模块应包括 1 个子阵天线、多个前置滤波器、1 个多通道接收组件和 1 个数字处理组件，所有组件安装在 1 个结构面板上。数字子阵模块应具备下列功能：

a） 完成无线信号的接收、低噪声放大、变频以及模数转换；
b） 在数字域完成滤波和变频处理；
c） 通过高速数字光纤链路，将处理后的波束基带数据及天线状态信息发送至主控单元，并接收主控单元下达的配置与控制指令。

5.2.3 软件系统

系统软件运行在硬件平台的 FPGA、嵌入式 CPU 等处理器中，采用分层分布式架构。

5.2.3.1 子阵控制与预处理软件

驻留在每个数字子阵模块的数字处理组件中，应具备下列功能：

a） 接收通道控制：对各接收通道的衰减及开关状态进行控制；
b） 信号采集与预处理：完成多通道 AD 数据采集、中频数字下变频、滤波及初级 DBF 合成；
c） 数据输出：通过并串转换及高速接口输出基带数据至主控单元。

5.2.3.2 DBF 主控处理软件

驻留在主控单元中，应具备下列功能：

a） 阵面监控管理：对全阵面各数字子阵模块、射频通道及关键参数的集中监控与状态管理；
b） 时频源控制：负责主控单元的时频源模块进行参数配置与工作状态控制；
c） 全阵 DBF 合成：汇聚各子阵基带数据，完成全阵数字波束形成及信号预处理；
d） 跟踪处理：基于 DBF 处理结果，完成目标信号的跟踪分析与处理。

5.2.3.3 天线控制软件

通常运行于主控单元或更高层的控制计算机，与主控单元紧密通信，应具备下列功能：

a） 天线状态监控：实时监测天线系统的工作状态、环境参数及设备健康状况；
b） 天线指向控制：根据系统指令，完成天线波束的指向控制；
c） 引导跟踪控制：支持外部引导信息的接入，并据此实现目标引导与自动跟踪功能。

6 技术要求

6.1 基本功能

系统应具备下列功能：

a） 二维电扫描：具备方位和俯仰二维电扫描能力；
b） 固件升级：具有固件升级接口，可在统一控制下快速完成模块固件升级；
c） 幅相校正：具有接收通道高精度幅相校正和补偿功能；
d） 测试接口：主控单元应提供至少一路接收中频/射频监视输出接口，或内部校准信号输出接口，用于外部仪表对系统关键参数进行监测；
e） 频率合成：集成频率合成器，基于内/外参考 10 MHz 时钟，产生各本振频率以及 ADC 时钟；
f） 监控管理：
    1） 各接收通道增益可分别同时控制；
    2） 可监控系统状态和关键参数，如电压、温度等；
    3） 具备故障自动诊断与定位、上报、统计、分析功能，故障定位至最小可更换单元。

6.2 主要技术指标

6.2.1 工作频段

工作频段应符合技术文件的规定。

6.2.2 极化方式

极化方式为左旋、右旋圆极化。

6.2.3 天线扫描范围

天线扫描范围应符合下列要求：

a) 方位±45°；
b) 俯仰±45°。

6.2.4 天线增益

天线法向增益 Gr≥20 lgN+2 dBi（N 为有效辐射天线单元数量，指标已包含天线罩损耗、子阵馈电损耗）。

6.2.5 第一旁瓣电平

第一旁瓣电平应符合技术文件的规定；

6.2.6 圆极化轴比

圆极化轴比应符合技术文件的规定；

6.2.7 同步及一致性要求

全工作温区、全工作频段内，通道间幅度差长期稳定性 RMS≤0.35 dB/24 h；通道间相位差长期稳定性 RMS≤2°/24 h。

6.3 环境适应性

系统应满足下列环境适应性要求：

a) 工作温度：-40 ℃～+65 ℃（天线舱）；
b) 存储温度：-55 ℃～70 ℃；
c) 相对湿度：不大于 95%（25 ℃）。

6.4 工作稳定性

系统通电试验时间应不少于 7 d，系统基本功能和主要技术指标不低于 6.1 和 6.2 的要求。

6.5 可靠性

系统平均无故障工作时间应不少于 5 000 h。

6.6 抗干扰性

6.6.1 应通过 GB/T 17626.2—2018 中严酷等级为 2 级（接触放电）的静电放电抗扰度试验。
6.6.2 应通过 GB/T 17626.3—2023 中严酷等级为 3 级的射频电磁场辐射抗扰度试验。
6.6.3 应通过 GB/T 17626.4—2018 中严酷等级为 3 级的电快速瞬变脉冲群抗扰度试验。
6.6.4 应通过 GB/T 17626.5—2019 中严酷等级为 3 级的浪涌（冲击）抗扰度试验。

7 试验方法

7.1 试验条件

7.1.1 试验环境

除有特殊要求的项目外，试验环境应满足下列条件：

a) 环境温度：5 ℃～45 ℃；
b) 环境湿度：相对湿度 45%～85%；
c) 大气压力：86 kPa～106 kPa。

7.1.2 电源条件

7.1.2.1 交流电源应满足下列条件：
a) 额定电压：允许偏差±10%；
b) 谐波：不大于 5%；
c) 频率：50 Hz，允许偏差±5%。

7.1.2.2 直流电源应满足下列条件：
a) 额定电压：允许偏差±10%；
b) 电压波纹：不大于 0.1%。

7.2 试验项目

7.2.1 基本功能

实际操作，按 6.1 的功能要求逐项进行检查，记录系统是否满足各项功能要求。

7.2.2 主要技术指标

7.2.2.1 工作频段

使用频谱分析仪在全频段内进行扫频测试，检验是否满足规定频段。

7.2.2.2 极化方式

在微波暗室中使用标准圆极化探头进行测试，验证其左旋与右旋圆极化性能。

7.2.2.3 天线扫描范围

在测试场地控制波束进行方位与俯仰扫描，使用角度测量设备记录最大扫描角度。

7.2.2.4 天线增益

按附录 A 的规定进行。

7.2.2.5 第一旁瓣电平

按附录 A 的规定进行。

7.2.2.6 圆极化轴比

按附录 A 的规定进行。

7.2.2.7 同步及一致性要求

7.2.3 环境适应性

7.2.3.1 低温工作： 按 GB/T 2423.1—2008 试验 A 执行，温度为-40 ℃，试验中系统应正常工作。
7.2.3.2 高温工作： 按 GB/T 2423.2—2008 试验 B 执行，温度为+65 ℃，试验中系统应正常工作。
7.2.3.3 低温存储： 按 GB/T 2423.1—2008 执行，温度为-55 ℃，恢复至常温系统应正常工作。
7.2.3.4 高温存储： 按 GB/T 2423.2—2008 执行，温度为+70 ℃，恢复至常温系统应正常工作。
7.2.3.5 恒定湿热： 按 GB/T 2423.3—2016 试验 Cab 执行，温度 25 ℃、湿度 95%，试验中及试验后系统应正常工作。

7.2.4 工作稳定性

7.2.4.1 系统连续无故障运行时，应满足 6.1 和 6.2 的规定。试验开始和结束时，均应测试系统功能和主要技术指标。并按规定的时间间隔测试系统功能，时间间隔应不大于 24 h。

7.2.4.2　试验中若出现关联性故障，则终止试验，待故障排除后重新计时进行试验。若出现非关联性故障，待故障排除后重新试验，排除故障的时间不计入试验时间。

7.2.5　可靠性

按 GB/T 5080.7 执行。除有明确规定的，一般采用定时截尾试验方案。失效判定应符合 GB/T 5080.1 的要求。

7.2.6　抗干扰性

7.2.6.1　静电放电抗扰度试验

按 GB/T 17626.2—2018 执行。

7.2.6.2　射频电磁场辐射抗扰度试验

按 GB/T 17626.3—2023 执行。

7.2.6.3　电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

按 GB/T 17626.4—2018 执行。

7.2.6.4　浪涌（冲击）抗扰度试验

按 GB/T 17626.5—2019 执行。

8　验收与运维

8.1　验收

8.1.1　验收时间与内容

系统全部安装完毕，经无故障试运行 10 d后进行系统验收。验收内容应包括文档验收、系统功能和主要技术指标检测等内容，验收合格后正式移交用户使用。

8.1.2　组织验收

8.1.2.1　验收组

验收组根据系统规模可由 5 人～13 人组成。验收组成员应具备以下条件：

a)　具有相关领域 3 年以上工作经验，或具有中级及以上技术职称；
b)　签署职业道德承诺书，声明无重大失信或违法违规记录；
c)　签署保密协议，承诺对验收过程中接触的技术资料承担保密责任。

8.1.2.2　系统验收

8.1.2.2.1　基本功能测试

按本文件要求进行功能检查，缺少一项功能，系统不能通过验收。

8.1.2.2.2　主要技术指标测试

按本文件要求进行主要技术指标检查，在相同环境下连续检测三次取平均值，有一项主要技术指标测试不合格，系统不能通过验收。

8.1.2.2.3　文档审查

对系统的文档资料进行标准化和质量审查。

8.1.3　提交成果

提交成果包括：

a)　用户验收报告；

b) 验收结论。

8.2 运维

8.2.1 系统在运行维护方面应符合 GB/T 28827.1 的规定。

8.2.2 应建立日常维护制度，定期对硬件设备及网络系统进行检查及维护，保证系统的兼容性和开放性。

附 录 A
（规范性）
主要指标和功能测试方法

A.1 天线增益测试

A.1.1 测试仪器和工具

见表 A.1。

表 A.1 测试仪器和工具

序号	名称	单位	数量
1	近场测试系统	套	1
2	微波暗室	间	1
3	天线架设工装	套	1
注：本表所列的仪器、仪表型号可用精度相当或更高的仪器代替。			

A.1.2 测试原理

A.1.2.1 在离开被测体 3 λ～5 λ (λ 为工作波长)距离上，用一个电特性已知的探头在被测体近区某一平面或曲面上扫描抽样（按照取样定理进行抽样）电磁场的幅度和相位数据，再经过严格的数学变换（快速傅里叶变换，简写为 FFT）计算出被测体远区场的电特性，这一技术称之为近场测量技术。

A.1.2.2 对辐射近场测量而言，根据取样表面的不同，可分为平面扫描技术、柱面扫描技术和球面扫描技术。针对本项目数字相控阵天线特点，采用平面近场测试，具体步骤如下：

a) 伺服近场扫描架系统完成所需要的近场采样区域的设置与伺服系统工作状态、探头行进位置的监测；
b) 近场扫描架系统具备水平、垂直扫描轴，可以实现探头在平面上的上下左右平移，可以完成采样区域的遍历。采样间隔满足抽样定律，小于 0.5 个波长。每次探头到位以后，反馈一个到位触发信号，同步数据记录设备；
c) 使用记录设备，利用监测通道的功能，将采样区域的幅度和相位信息进行记录；
d) 天线的远场方向图可通过公式（A.1）进行计算：

$$F(\theta,\varphi)=\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}I_{m,n}\cdot e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}(m\cdot dx\cdot\sin\theta\cdot\cos\varphi+n\cdot dy\cdot\sin\theta\cdot\sin\varphi)} \tag{A.1}$$

式中：

$F(\theta,\varphi)$——天线在极坐标系(θ,φ)下的远场方向图；

θ,φ——极坐标系的角度分量，θ 是角度矢量与+Z 轴的夹角，φ 是角度矢量在赤道面上投影与+X 轴的夹角；

$I_{m,n}$——在 m、n 位置的幅相激励复数；

λ——工作波长；

dx——m 方向的采样间距；

dy——n 方向的采样间距。

A.1.2.3 原理框图见图 A.1。

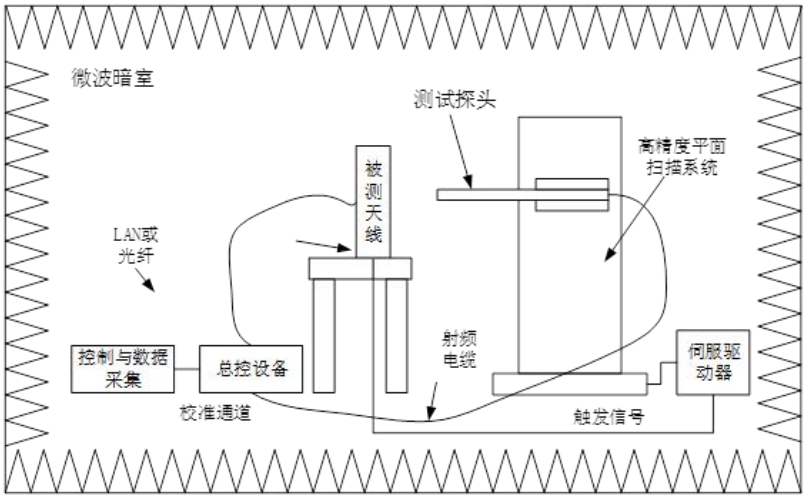


图 A.1 原理框图

A.1.3 测试步骤

连接天线与平面近场测试系统，并按照如下步骤开始测试：

a) 控制与数字采集设备开机，被测天线开机，高精度平面扫描系统开机，系统预热 30 min；
b) 设置被测天线工作频率为 $f1$，波束指向法向，监测通道输出点频连续波，通道数据按照扫描架系统触发下传的模式；
c) 设置高精度平面扫描系统的初始状态，包括探头极化为 H 极化，零点位置、扫描间隔、探头行进方式、扫描区域范围、探头速度、探头加速度；
d) 启动伺服系统，数据采集同步采集近场幅相数据，记录该数据为 I_{Hf1}；
e) 转动探头极化为 V 极化，重新启动伺服系统，数据采集同步采集近场幅相数据，记录该数据为 I_{Vf1}；
f) 更换其他频率 $f2$、$f3$，并重新测试两个极化的近场幅相数据，记录为 I_{Hf2}，I_{Vf2}、I_{Hf3}，I_{Vf3}；
g) 设置被测天线波束指向为方位扫描+45°，重复步骤 b)～f)；
h) 设置被测天线波束指向为俯仰扫描+45°，重复步骤 b)～f)。

A.1.4 数据处理

A.1.4.1 使用 I_{Hf1}、I_{Vf1} 两组极化数据分别合成右旋和左旋极化分量 IR_{f1}、IL_{f1}，按公式（A.2）和（A.3）进行计算：

$$IR_{f1} = I_{Hf1} + I_{Vf1} \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad \text{(A.2)}$$

式中：

IR_{f1}——右旋极化分量；

I_{Hf1}——同 A.1.3；

I_{Vf1}——同 A.1.3；

$e^{-j\frac{\pi}{2}}$——相位偏移因子。

$$IL_{f1} = I_{Hf1} + I_{Vf1} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \quad \text{(A.3)}$$

式中：

IL_{f1}——左旋极化分量；

I_{Hf1}——同 A.1.3；

I_{Vf1}——同 A.1.3；

$e^{j\frac{\pi}{2}}$——相位偏移因子。

A.1.4.2 使用公式（A.1），将 IR_{f1}、IL_{f1} 分别进行法向远场方向图计算，分别获取右旋、左旋的和波

束方向图 $FsR_{f1}(\theta,\varphi)$、$FsL_{f1}(\theta,\varphi)$，右旋的差波束方向图 $FdaR_{f1}(\theta,\varphi)$ 、$FdeR_{f1}(\theta,\varphi)$，根据差波束的零深位置分析波束指向。

A.1.4.3 由于天线主极化为右旋圆极化，按公式（A.4）进行增益计算：

$$GR_{f1} = DR_{f1} - LM_{f1} \quad \text{(A.4)}$$

式中：

GR_{f1}——为频率 $f1$ 的右旋接收增益；

DR_{f1}——为频率 $f1$ 的右旋接收方向性系数；

注：其中 DR_{f1} 按公式（A.5）进行计算。

$$DR_{f1} = \frac{4\pi\left(FsR_{f1\max}\right)^2}{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\left[FsR_{f1}(\theta,\varphi)\right]^2\sin(\theta)d\theta d\varphi} \quad \text{(A.5)}$$

LM_{f1}——为频率 $f1$ 的系统损耗，包含天线失配损耗、天线罩损耗。

A.1.4.4 重复上述步骤可以计算出法向所有频率的接收增益 DR_{fn} 和方位俯仰扫描后的接收增益。

A.2 第一旁瓣电平测试

A.2.1 测试原理

同天线增益测试原理。

A.2.2 数据处理

A.2.2.1 使用 I_{Hf1}、I_{Vf1} 两组极化数据分别合成右旋和左旋极化分量 IR_{f1}、IL_{f1}，按公式（A.2）和（A.3）进行计算。

A.2.2.2 使用公式（A.1），将 IR_{f1}、IL_{f1} 分别进行法向远场方向图计算，分别获取右旋、左旋的方向图 $FxtR_{f1}(\theta,\varphi)$、$FxtL_{f1}(\theta,\varphi)$。

A.2.2.3 获取方向图数据 $FxtR_{f1}(\theta,\varphi)$ 后，通过数据处理的方式，获取天线的副瓣电平，天线副瓣电平获取方式如图 A.2 所示。

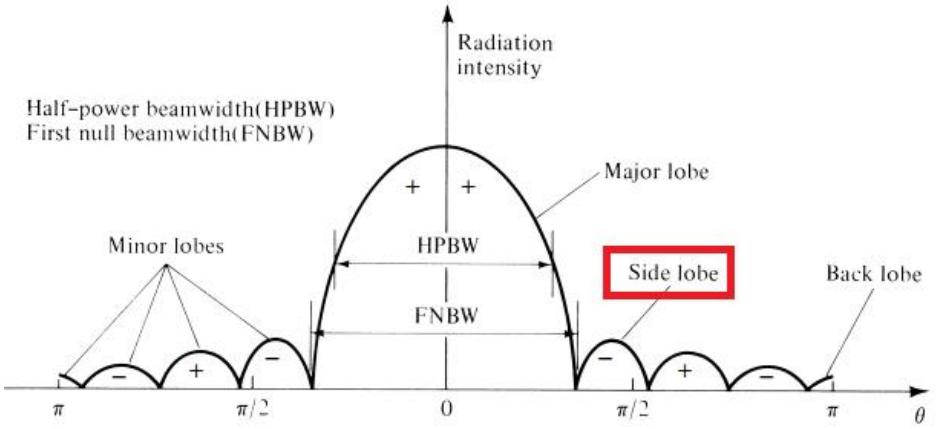


图 A.2 天线方向图

A.3 轴比测试

A.3.1 测试原理

同天线增益测试原理，获取两个极化的方向图后，通过公式计算天线轴比。

A.3.2 测试步骤

同天线增益测试。

A.3.3 数据处理

A.3.3.1 使用 I_{Hf1}、I_{Vf1} 两组极化数据分别合成右旋和左旋极化分量 IR_{f1}、IL_{f1}，按公式（A.2）和（A.3）进行计算。

A.3.3.2 使用公式（A.1），将 IR_{f1}、IL_{f1} 分别进行法向远场方向图计算，分别获取右旋、左旋的和波束方向图 $FsR_{f1}(\theta,\varphi)$、$FsL_{f1}(\theta,\varphi)$。

A.3.3.3 圆极化轴比 AR_{f1} 按公式（A.6）进行计算：

$$AR_{f1}=20\log\left(\frac{1+FxtL_{f1}(0,0)/FxtR_{f1}(0,0)}{1-FxtL_{f1}(0,0)/FxtR_{f1}(0,0)}\right) \quad \text{(A.6)}$$

A.3.3.4 重复以上步骤，获取所有频率的轴比。

A.4 同步及一致性测试

同步及一致性测试步骤如下：

a) 将设备放置于温箱，连接设备和仪器，各设备加电并预热 30 min；

b) 监控软件配置通道校正工作模式，完成通道校正；

c) 设置工作参数为组 1，测试并计算各通道幅度值 A_{mn}，幅度差 ΔA_{mn}，相位差 $\Delta\varphi_{mn}$，记录数据，第一下标表示重复开机次数，第二个下标表示通道号；

d) 再重复开机 4 次，重复步骤 c)；

e) 计算 5 次测试最大值记录为通道间幅度差异，计算 5 次测量的幅度、相位均值 $\Delta\overline{A_n}$、$\Delta\overline{\varphi_n}$，按公式（A.7）计算幅度稳定性；按公式（A.8）计算相位稳定性并记录结果：

$$\sigma_A=\sqrt{\frac{1}{5-1}\sum_{m=1}^{5}(\Delta A_{mn}-\Delta\overline{A_n})^2} \quad \text{(A.7)}$$

式中：

σ_A——幅度稳定性；

ΔA_{mn}——幅度差；

$\Delta\overline{A_n}$——幅度均值。

$$\sigma_\varphi=\sqrt{\frac{1}{5-1}\sum_{m=1}^{5}(\Delta\varphi_{mn}-\Delta\overline{\varphi_n})^2} \quad \text{(A.8)}$$

式中：

σ_φ——相位稳定性；

$\Delta\varphi_{mn}$——相位差；

$\Delta\overline{\varphi_n}$——相位均值。

f) 分别设置工作参数为组 2，组 3，重复步骤 c)～e)，测试、计算并记录数据。