



中华人民共和国国家军用标准

FL 1610

GJB 11648—2024

导航卫星星载可移波束天线在轨指向 标校方法

On-orbit calibration method of beam pointing for beam-steerable antennas on
navigation satellites

2025—01—07 发布

2025—03—01 实施



中央军委装备发展部 颁布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和定义	1
4 标校原理	1
4.1 标校系统组成	1
4.2 波束指向误差标定	1
4.3 波束指向误差校正	1
4.4 波束扫描原理	2
5 一般要求	3
5.1 标校时机	3
5.2 标校依据	3
5.3 标校站要求	3
5.4 标校条件	4
6 标校参数与流程	4
6.1 标校参数	4
6.2 标校流程	5
7 波束指向误差标定	5
7.1 标定准备	5
7.2 待标校天线波束扫描	6
7.3 数据采集与处理	7
7.4 波束指向误差的判读	9
8 波束指向误差校正	9
8.1 校正参数计算	9
8.2 校正指令的上注	9
8.3 校正效果评价	10
9 异常处理	10
10 标校文件要求	10
附录 A (规范性附录) 波束指向的表示	11
附录 B (规范性附录) 主平面扫描点位计算	13
附录 C (资料性附录) 方向图函数的 Gaussian 拟合	14
附录 D (资料性附录) 装星误差矩阵实测值的计算	15

前 言

本标准附录 A、附录 B 是规范性附录，附录 C、附录 D 是资料性附录。

本标准由中国航天科技集团有限公司提出。

本标准起草单位：中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部、中国人民解放军 63921 部队、中国空间技术研究院西安分院、中国航天标准化研究所。

本标准主要起草人：庄建楼、康成斌、郑晋军、张 旭、张若禹、杨文丽、宋 铮、王 超、王子玉、张建军、王 璐、李振东、康登榜。

导航卫星星载可移波束天线在轨指向标校方法

1 范围

本标准规定了导航卫星星载可移波束天线的标校原理、一般要求、标校参数与流程、波束指向误差标定、波束指向误差校正、异常处理及标校文件要求等内容。

本标准适用于中高轨导航卫星机械可移波束天线、相控阵天线两类微波天线的在轨指向标校，低轨等其他轨道导航卫星、其他类型航天器可移波束天线的在轨指向标校可参照使用。

2 引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本标准的条款。凡注日期或版次的引用文件，其后的任何修改单(不包括勘误的内容)或修订版本都不适用于本标准，但提倡使用本标准的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡不注日期或版次的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GJB 421 卫星术语
- GJB 1028A—2017 航天器坐标系
- GJB 1035 卫星天线通用规范
- GJB 2436 天线术语
- GJB 8482 微波功率计通用规范
- YD/T 984 卫星通信链路大气和降雨衰减计算方法

3 术语和定义

GJB 421、GJB 1035 和 GJB 2436 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1 波束指向误差 **beam pointing error**

瞄准误差

电轴误差

天线电轴偏离参考轴的角度。

3.2 波束指向误差分量 **components of beam pointing error**

在选定的坐标系上，天线电轴和参考轴各个坐标分量的差值。

3.3 UV 坐标系 **UV coordination**

用于表示空间单位矢量的平面直角坐标系， U 轴、 V 轴方向与三维直角坐标系的 X 轴、 Y 轴一致。

4 标校原理

4.1 标校系统组成

在轨指向标校系统主要由地面站系统、待标校卫星组成。如图 1 所示，其中，地面站系统由标校地面站(简称标校站)、测控地面站(简称测控站)组成，待标校卫星包含待标校天线、指向控制软件。

4.2 波束指向误差标定

如图 1 所示，利用待标校天线波束对标校站进行波束扫描，标校站测量待标校天线下行信号的功率电平，经数据采集和处理后得出待标校天线的波束指向误差。

4.3 波束指向误差校正

如果经判读波束指向误差不满足要求，则进一步计算指向误差校正参数，通过测控站上注到待标校卫星，指向控制软件使用更新后的参数对待标校天线进行指向控制，从而实现指向误差校正。

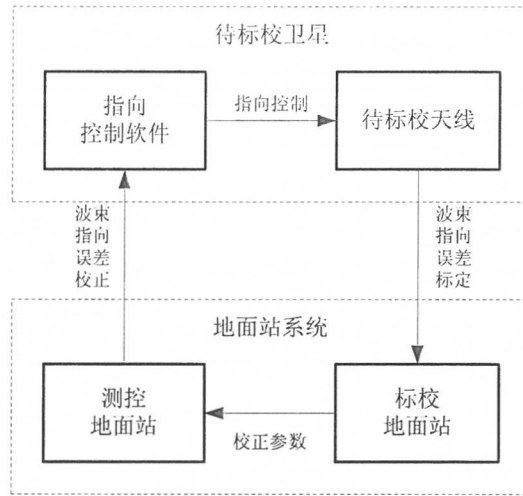


图 1 在轨指向标校系统组成

4.4 波束扫描原理

4.4.1 波束扫描分类

根据待标校卫星的轨道类型，波束扫描主要可区分为 GEO 波束扫描和非 GEO 波束扫描两类，其中：

- a) GEO 波束扫描：包括主平面扫描和栅格扫描两类；
- b) 非 GEO 波束扫描：包括固定指向波束扫描和叠加扫描两类。

4.4.2 主平面扫描

如图 2 所示，主平面扫描由球面上一对正交的大圆弧扫描组成，大圆弧所在平面为主平面，并分别称为主平面 1 和主平面 2。

4.4.3 栅格扫描

如图 3 所示，栅格扫描(raster scan，又称光栅扫描)由球面上矩形点阵的逐行或逐列扫描组成，其中点阵可分解为多组主平面的交点。

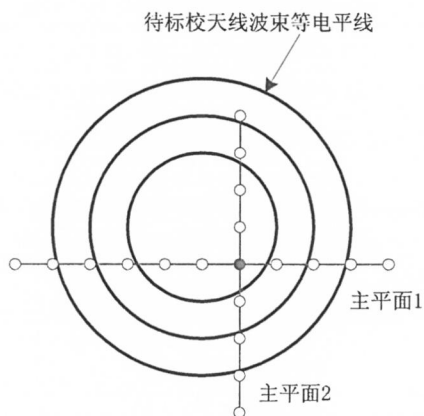


图 2 主平面扫描示意图

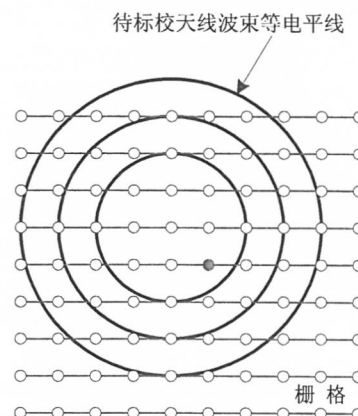


图 3 栅格扫描示意图

4.4.4 固定指向波束扫描

如图 4 所示，保持待标校天线指向不变，利用非 GEO 卫星与标校站的相对运动实现波束对标校站的扫描。

4.4.5 叠加扫描

如图 5 所示，在待标校天线保持对标校站的跟踪过程中，指向跟踪角度叠加以即时标校站方向为参考轴的主平面扫描或栅格扫描。

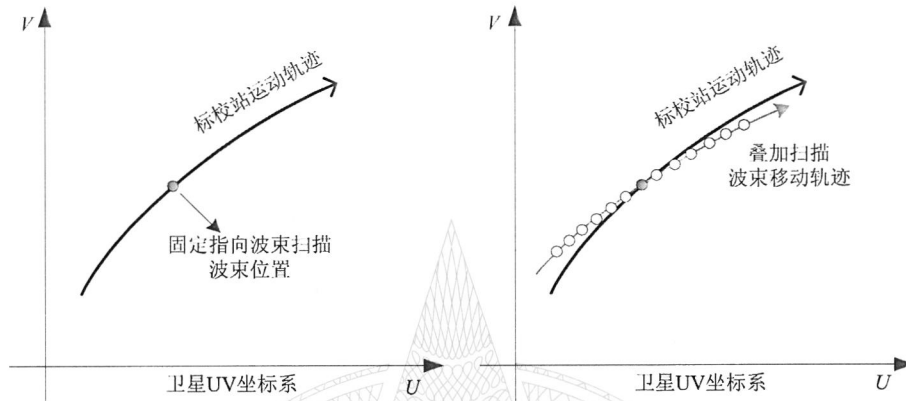


图 4 固定指向波束扫描示意图

图 5 叠加扫描示意图

5 一般要求

5.1 标校时机

在轨指向标校一般应在卫星发射入轨后的在轨测试期间进行，或在卫星在轨运行期间发生较大波束指向误差，影响链路正常工作时再次开展。

5.2 标校依据

在轨指向标校的依据为待标校天线研制技术要求、待标校卫星在轨测试与试验要求。

待标校天线在轨波束指向误差一般不大于其半功率波束宽度的 1/10 量级。

5.3 标校站要求

5.3.1 组成

标校站主要由放置在地面的天线、低噪声放大器(LNA)、信号测量设备、数据处理设备、高频电缆、低频电缆等组成，如图 6 所示。

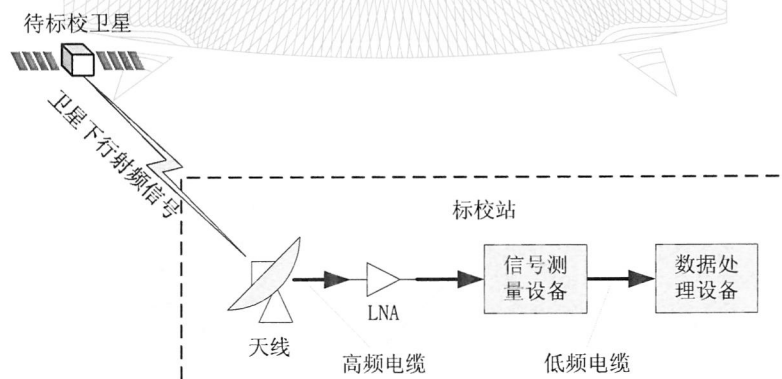


图 6 标校站简图

卫星下行射频信号经标校站天线接收并通过低噪声放大器放大后，使用频谱仪或功率计进行数据采集，最后由数据处理设备进行处理，得出波束指向误差数据。

5.3.2 天线要求

天线用于接收卫星下行射频信号，应满足以下要求：

- a) 频率及带宽：覆盖卫星下行射频信号频率及带宽；
- b) 极化：覆盖卫星下行射频信号极化；
- c) 指向与跟踪：具备根据卫星轨道根数或定点经纬度指向并跟踪待标校卫星的能力，包括在卫星过顶条件下保持跟踪的能力。

5.3.3 低噪声放大器要求

低噪声放大器用于放大天线的输出信号，应满足以下要求：

- a) 频率及带宽：覆盖卫星下行射频信号频率及带宽；
- b) 噪声系数：一般优于 3dB；
- c) 增益稳定性：一般优于 0.1dB/12h。

5.3.4 信号测量设备要求

信号测量设备用于测量卫星下行射频信号电平，一般为频谱仪或功率计，应满足以下要求：

- a) 频率及带宽：覆盖卫星下行射频信号频率及带宽；
- b) 测量精度：一般优于 0.1dB；
- c) 测量稳定性：一般优于 0.1dB/12h；
- d) 功率计一般满足 GJB 8482 要求。

5.3.5 数据处理设备要求

数据处理设备用于分析测量数据，一般为通用计算机，应满足以下要求：

- a) 接口要求：具有与信号测量设备的数据接口；
- b) 功能要求：能够存储并处理信号测量设备的测量数据。

5.3.6 其他要求

主要包括：

- a) 计量与技术安全要求：标校站所使用的测量仪器、测试设备、高低频电缆应符合计量与技术安全要求，并在有效期内；
- b) 人员要求：标校站操作人员应经过上岗培训，熟悉待标校天线在轨工作原理与地面测量仪器、测试设备的操作方法。

5.4 标校条件

开展在轨指向标校测试工作的条件为：

- a) 测控弧段：已完成测控弧段的分配；
- b) 室外温度：15℃~35℃；
- c) 室外相对湿度：20%~80%；
- d) 气象：标校过程中保持为晴朗或少云；
- e) 风速：一般≤4级；
- f) 天线仰角：≥15°；
- g) 电磁环境：测试频段内背景噪声或干扰功率一般低于待测信号 10dB。

6 标校参数与流程

6.1 标校参数

6.1.1 直接测量参数

指可在标校站对待标校天线直接测量的参数，以及可在测控站获得的待标校天线遥测参数，典型直接测量参数包括：

- a) 待标校天线发射信号功率电平；
- b) 待标校天线指向角度遥测数据。

6.1.2 标定参数

指表征待标校天线波束指向的参数，典型标定参数包括：

- a) 待标校天线波束电轴；
- b) 待标校天线波束指向误差；
- c) 待标校天线波束指向误差分量。

6.1.3 校正参数

指在轨可更新的指向控制软件参数，典型校正参数包括：

- a) 装星误差矩阵：天线机械坐标系与卫星机械坐标系的变换矩阵；
- b) UV 修正量：在卫星或天线 UV 坐标系中的波束指向误差分量。

6.2 标校流程

在轨指向标校主要包括标定准备、待标校天线波束扫描、数据采集与处理、波束指向误差判读、校正参数计算、校正指令上注等几个主要步骤，一般流程如图 7 所示。

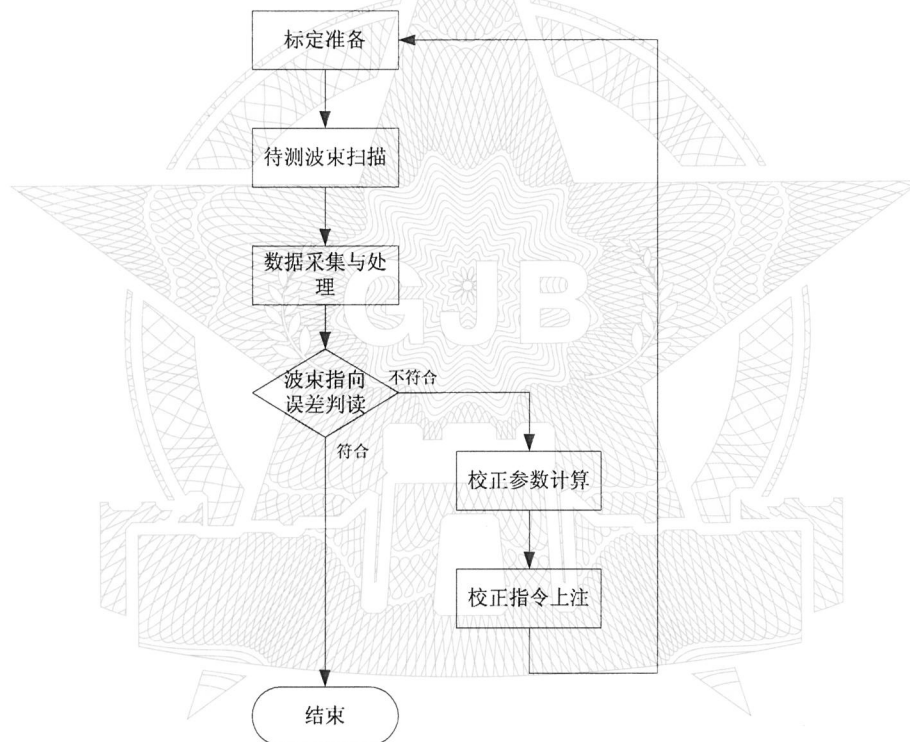


图 7 在轨指向标校流程

7 波束指向误差标定

7.1 标定准备

7.1.1 制定标定计划

7.1.1.1 天线指向计算

计算待标校天线、标校站天线指向，包括：

- a) 待标校天线指向：待标校天线以标校站为目标的波束指向，波束指向的表示一般采用球坐标向量 (θ, ϕ) ，见附录 A；
- b) 标校站天线指向：标校站天线以待标校卫星为目标的指向方位角和仰角。

指向计算时长应包含至少一个完整轨道周期，时间间隔不大于 1min。

7.1.1.2 确定标校弧段

根据天线指向计算结果选取可标校时段，约束条件为：

- a) 待标校卫星姿态无大角度机动，例如快速偏航等；
- b) 标校站在卫星 UV 坐标系中的运动轨迹平缓，近似直线段；
- c) 标校站天线指向仰角大于 15° 。

确定可标校时段后，应向测控站申请待标校卫星在该时间段的测控链路。

7.1.2 标校状态初始化

7.1.2.1 待标校卫星状态初始化

通过测控链路发送指令，使待标校天线按计算角度指向标校站。对于非 GEO 卫星，还应使待标校天线保持对标校站的跟踪。

通过测控链路发送指令，使待标校天线发射指定频点的射频信号。射频信号一般为单载波信号。

7.1.2.2 标校站状态初始化

标校站天线指向待标校卫星，并接收待标校天线发射的射频信号。

对标校站信号测量设备进行校准，完成初始信号电平测试。

7.2 待标校天线波束扫描

7.2.1 GEO 卫星波束扫描

7.2.1.1 主平面扫描

主平面扫描点位是在球坐标系正交于参考轴的球面大圆上的一系列离散点，其中同时位于两个主平面上的扫描点位为参考轴。主平面扫描点位计算方法见附录 B。

按附录 A 计算的待标校天线指向 θ 角的取值，当 $\theta \leq 15^\circ$ 时，主平面扫描点位可近似为 UV 坐标系正交于参考轴的等 U 线、等 V 线上的一系列离散点。

对主平面 1 和主平面 2 上的扫描点位进行顺序编号，其中参考轴按两个扫描点位计算，每个扫描点位编号唯一。

7.2.1.2 栅格扫描

栅格扫描的扫描点位在多组交于不同方向的主平面上确定，应设定其中一个扫描点位作为参考轴。各个主平面扫描点位按附录 B 计算。

按逐行或逐列方式对栅格扫描点位进行顺序编号，每个点位编号唯一。

7.2.2 非 GEO 卫星的波束扫描

7.2.2.1 固定指向波束扫描

利用非 GEO 卫星相对于标校站的运动特性，可实现待标校天线固定指向波束对标校站的扫描。

如图 8 所示，设 7.1.1.2 选定的非 GEO 卫星测试弧段，开始于 T_1 ，结束于 T_2 ， T_0 为中点时刻，计算待标校天线在 T_0 时刻指向标校站的角度 (θ_0, ϕ_0) ，并在 T_1 时刻通过测控链路发送指令，使待标校天线提前指向 (θ_0, ϕ_0) 并保持，在 $T_1 \sim T_2$ 时段内，待标校卫星飞经标校站上空的过程中，实现波束对标校站的扫描，扫描点位即标校站所处指向。 T_0 时刻扫描点位为参考轴。

7.2.2.2 叠加扫描

非 GEO 卫星在经过标校站上空时，待标校天线的叠加扫描是两种运动的叠加，第一种运动是对标校站的指向跟踪；第二种运动是以即时标校站方向为参考轴的波束扫描，包括主切面扫描和栅格扫描两种形式，因此叠加扫描具体分为叠加主平面扫描和叠加栅格扫描两种形式。

叠加主平面扫描(或栅格扫描)点位的计算步骤具体如下：

- a) 确定扫描点位数量和编号：以不特定方向为参考轴，按 7.2.1.1(或 7.2.1.2)确定主平面扫描(或栅格扫描)点位的数量 N 和编号 i ；
- b) 设置指向跟踪点位：在测试弧段内选取 N 个离散时刻，并为其分配唯一的波束扫描点位编号 i ，每个时刻记为 T_i ，计算 T_i 时刻的标校站指向作为指向跟踪点位；

- c) 计算叠加扫描点位：对于每个 T_i 时刻，以该时刻指向跟踪点位为参考轴，按 7.2.1.1(或 7.2.1.2) 确定主平面扫描(或栅格扫描)点位，并选取其中编号为 i 的点位，作为该时刻的叠加扫描点位。

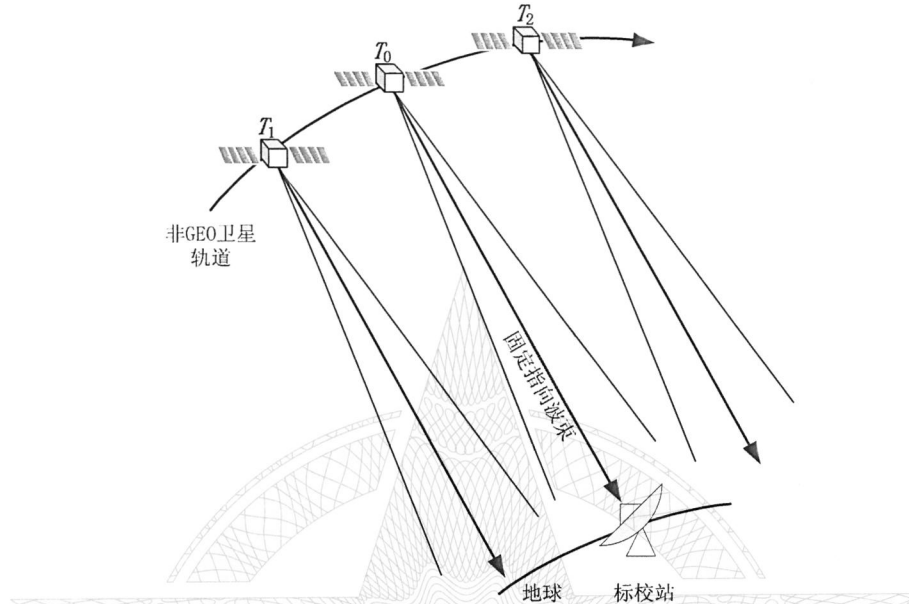


图 8 非 GEO 卫星对标校站的固定指向波束扫描

7.2.3 波束扫描的约束条件

实施波束扫描，应考虑以下约束条件：

- GEO 卫星星地链路指向变化范围一般不大于待标校天线半功率波束宽度的 1/10 量级，适用 GEO 卫星波束扫描，否则应采用非 GEO 卫星波束扫描；
- 非 GEO 卫星固定指向波束对地扫描的测量时刻间隔，采用等长的角距步进；
- 波束扫描的角度步进，优于期望的波束指向误差标定精度；
- 波束在每一个扫描点位，既要停留足够长的时间，以提高测量精度和稳定性，又要缩短扫描点的时间间隔，以避免星地双方天线角度、链路特性发生较大变化；
- 波束扫描范围应包括待标校天线的半功率波束宽度；
- 特殊情况下，调整待标校卫星的姿态使待标校天线的波束对标校站实施波束扫描。

7.3 数据采集与处理

7.3.1 数据采集

在待标校天线波束扫描期间，标校站天线保持对待标校卫星的指向跟踪，接收卫星下行射频信号，使用信号测量设备测量并记录信号测量值、星地天线指向角度、测量时刻。

卫星下行射频信号经空间衰减、标校站天线接收和 LNA 放大后的功率，应处在频谱仪或功率计量程内。

数据采集期间，当卫星下行射频信号的多普勒频移发生变化时，应及时更新信号测量设备测量频率。

7.3.2 数据修正

7.3.2.1 非 GEO 星地链路衰减的修正

当待标校卫星为非 GEO 卫星时，由于实测数据 P 是在不同观测仰角取得，应进行与仰角有关的空间衰减、大气衰减等参数的修正，得出仅包含波束特性的修正数据 P' ，计算方法见公式(1)。

$$P' = P - L_{sp} - L_{atm} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

P' ——修正数据, dBm 或 dBW;

P ——实测数据, dBm 或 dBW;

L_{sp} ——空间衰减, dB;

L_{atm} ——大气衰减, dB。

大气衰减 L_{atm} 计算方法见 YD/T 984。

7.3.2.2 空间衰减计算

空间衰减 L_{sp} (dB) 的计算方法见公式(2)。

$$L_{sp} = 20 \lg \frac{\lambda}{4\pi R} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

λ ——待标校卫星下行射频信号中心频点载波的自由空间波长, m;

R ——待标校卫星到标校站的距离, m。

待标校卫星到标校站的距离 R 计算方法见公式(3)。

$$R = \sqrt{(R_e + H)^2 - (R_e \cos E)^2} - R_e \sin E \dots\dots\dots (3)$$

式中:

R_e ——地球半径, m;

H ——待标校卫星到星下点的距离, m;

E ——标校站观测待标校卫星的仰角, (°)。

7.3.3 方向图绘制

7.3.3.1 直角坐标方向图绘制

采用数值拟合方法(如 Gaussian 函数拟合, 参见附录 C), 绘制修正后数据 P' 的拟合曲线, 横轴为扫描角度或时刻, 纵轴单位为 dBm 或 dBW, 即为直角坐标方向图。标出参考轴和峰值(即电轴)对应的角度或时刻。

7.3.3.2 等电平线方向图绘制

采用数值拟合方法绘制修正后数据 P' 等值线, 横轴和纵轴为扫描角度, 即为等电平线方向图。标出参考轴和峰值(即电轴)点位。

7.3.4 确定电轴方向或波束指向误差分量

7.3.4.1 主平面扫描确定波束指向误差分量

对于主平面扫描得出的两个直角坐标方向图, 分别读出电轴偏离参考轴的角度, 即为波束指向误差分量。

7.3.4.2 栅格扫描确定电轴或波束指向误差分量

对于栅格扫描得出的等电平线方向图, 读出等电平线峰值坐标, 即为电轴方向。

以参考轴方向为原点, 电轴在两个坐标轴上的投影即为波束指向误差分量。

7.3.4.3 叠加扫描确定波束指向误差分量

对于叠加扫描, 根据所叠加的波束扫描类型, 叠加主平面扫描按 7.3.4.1 确定波束指向误差分量, 叠加栅格扫描按 7.3.4.2 确定波束指向误差分量。

7.3.4.4 固定指向波束扫描确定电轴方向

当采用固定指向波束扫描获得的直角坐标方向图计算波束指向误差时, 设直角坐标方向图上参考轴对应时刻为 T_0 , 电轴对应时刻为 T'_0 , 根据 7.1.1.1 的待标校天线指向数据, 查询 T'_0 时刻指向 (θ'_0, ϕ'_0) 近似作为该测试弧段的电轴方向。

7.3.5 波束指向误差的计算

7.3.5.1 根据电轴计算波束指向误差

按 7.3.3.2 或 7.3.4.4 确定电轴方向。当采用 UV 坐标系时，按附录 A 把电轴 UV 坐标向量换算为球坐标向量。根据公式 (4) 计算电轴 (θ'_0, ϕ'_0) 与参考轴 (θ_0, ϕ_0) 的夹角，即波束指向误差。

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \arccos(\sin \theta'_0 \sin \theta_0 \cos(\phi'_0 - \phi_0) + \cos \theta'_0 \cos \theta_0) \dots \dots \dots (4)$$

式中：

ε ——波束指向误差，(°)；

(θ_0, ϕ_0) ——参考轴球坐标向量，rad；

(θ'_0, ϕ'_0) ——电轴球坐标向量，rad。

按 7.3.4.4 确定电轴方向时，在多个不同测试弧段开展固定指向波束扫描，对波束指向误差进行综合评估。

7.3.5.2 根据指向误差分量计算波束指向误差

按 7.3.4.1 或 7.3.4.2 确定波束指向误差分量。当采用 UV 坐标系时，按附录 A 把波束指向误差分量换算为角度值。波束指向误差近似计算方法见公式 (5)。

$$\varepsilon \approx \sqrt{a^2 + b^2} \dots \dots \dots (5)$$

式中：

ε ——波束指向误差，(°)；

a, b ——波束指向误差分量，(°)。

7.4 波束指向误差的判读

实测波束指向误差满足 5.2 的要求，判断为待标校天线波束指向误差符合要求，否则判断为待标校天线波束指向误差不符合要求。

对于出现波束指向误差不符合要求的情况，进一步开展波束指向误差校正工作。

8 波束指向误差校正

8.1 校正参数计算

8.1.1 装星误差矩阵计算

按 7.1.1~7.3.4 方法，在至少 3 个不同的参考轴方向标定电轴方向，计算得出装星误差矩阵实测值，计算方法参见附录 D。

经实测得出的装星误差矩阵，应进行归一化和正交化处理。

8.1.2 UV 修正量计算

天线 UV 坐标系下的目标波束指向，等于卫星 UV 坐标系下的目标波束指向与 UV 修正量的向量和。按 7.1.1~7.3.4 方法，在至少 2 个不同的参考轴方向标定 UV 坐标系下的波束指向误差分量，若各次标定的指向误差分量呈现为系统误差，则 UV 修正量计算方法见公式 (6)。

$$(\Delta U', \Delta V') = (\Delta U, \Delta V) - (\bar{\varepsilon}_u, \bar{\varepsilon}_v) \dots \dots \dots (6)$$

式中：

$(\Delta U', \Delta V')$ ——校正后 UV 修正量；

$(\Delta U, \Delta V)$ ——当前 UV 修正量；

$\bar{\varepsilon}_u, \bar{\varepsilon}_v$ ——UV 坐标系平均波束指向误差分量。

若各次标定的指向误差分量呈现为随机误差，则按第 9 章进行异常处理。

8.2 校正指令的上注

把校正参数按照一定的指令格式编制为可上注的指令，并通过测控站上注执行。

8.3 校正效果评价

按第 7 章重复开展波束指向误差标定，如果实测波束指向误差满足 5.2 的要求，则波束指向误差校正结束；如果仍不满足 5.2 的要求，则按第 9 章进行异常处理。

9 异常处理

标校过程中可能出现的异常情况及处理措施如下：

- a) 在标定、校正过程中，若发生待标校天线或指向控制软件不能正常响应测控站发送的指令的情况，应中断标校；
- b) 在数据采集过程中，若发生标校站天线的基准发生改变，造成天线波束指向偏离待标校卫星的情况，应中断数据采集；
- c) 在校正参数计算过程中，若发生多个参考轴方向标定的波束指向误差分量呈现为随机误差，应中断波束指向校正；
- d) 在按第 8 章要求进行校正并再次标定后，若发生波束指向误差仍不满足 5.2 要求的情况，应对标定数据和校正措施进行重新评估。

待异常情况排除后，恢复或重新进行标校工作。

10 标校文件要求

在轨指向标校完成后，应形成在轨指向标校报告，对标定和校正过程、测试数据进行总结，主要内容包包括：

- a) 标校依据；
- b) 标校过程；
- c) 在轨指向标定结果；
- d) 在轨指向校正结果；
- e) 结论；
- f) 附录：数据和曲线记录。

附录 A
(规范性附录)
波束指向的表示

如图 A.1 所示, 在直角坐标系 OXYZ 中, 波束指向沿单位矢量 \overline{OP} 方向, P 点在 XOY 平面上的投影为 P' 点。设 P 点直角坐标为 (x, y, z) 。在以直角坐标系 OXYZ 为过渡直角坐标系的球坐标系中, P 点球坐标为 $(1, \theta, \phi)$, 其中 θ 为 \overline{OP} 与 +Z 轴夹角, ϕ 为 \overline{OP} 与 +X 轴夹角。在由 X 轴和 Y 轴构成 UV 坐标系, P' 点在 UV 坐标系内的坐标为 (u, v) 。直角坐标系 OXYZ 一般为卫星本体坐标系见 GJB 1028A—2017。

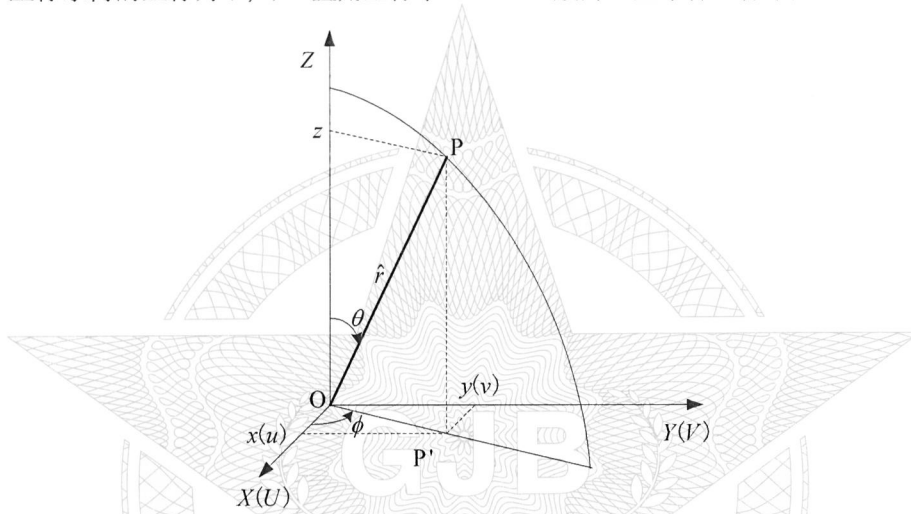


图 A.1 波束指向示意图

在上述约定下, 波束指向表示为以下向量形式:

- a) 直角坐标向量, 记为 (x, y, z) ;
- b) 球坐标向量, 记为 (θ, ϕ) ;
- c) UV 坐标向量, 记为 (u, v) 。

有公式(A.1)的关系成立。

$$\begin{cases} x = \sin\theta \cos\phi = u \\ y = \sin\theta \sin\phi = v \\ z = \cos\theta = \pm\sqrt{1-u^2-v^2} \end{cases} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- (x, y, z) ——点 P 的直角坐标向量;
- (θ, ϕ) ——点 P 的球坐标向量, rad;
- (u, v) ——点 P' 的 UV 坐标向量。

有公式(A.2)的关系成立。

$$\begin{cases} \theta = (-1)^n \arcsin\sqrt{u^2+v^2} + n\pi & n = 0, 1 \\ \phi = \arctan\frac{v}{u} + m\pi & m = -1, 0, 1 \end{cases} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

n ——待定系数, 点 P 位于 $z \geq 0$ 半空间取 0, 其他情况取 1;

m ——待定系数, 点 P 位于 $x \geq 0$ 半空间取 0, 位于 $x < 0$ 且 $y \geq 0$ 区域取 1, 其他情况取 -1。

在 UV 坐标系中, 点 P' UV 坐标向量按公式(A.3)换算为角度值。

$$(u_{\text{deg}}, v_{\text{deg}}) = \frac{180}{\pi}(\arcsin u, \arcsin v) \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$(u_{\text{deg}}, v_{\text{deg}})$ ——点 P' UV 坐标向量的角度值, °。

附录 B
(规范性附录)
主平面扫描点位计算

如图 B.1 所示, 在半径为 1 的单位球上, $\hat{r} = \overline{OP}$ 指向 (θ_0, ϕ_0) 方向。弧 APB 在过 P 点的等 ϕ 线上, 其在 XOY 面 (UV 坐标系) 上的投影为半径上的线段 A'B'; 弧 CPD 在与弧 APB 垂直且过 OP 的大圆上, 其在 UV 坐标系内的投影为弧 C'P'D'。弧 EPF 为过 P 点的等 θ 线。

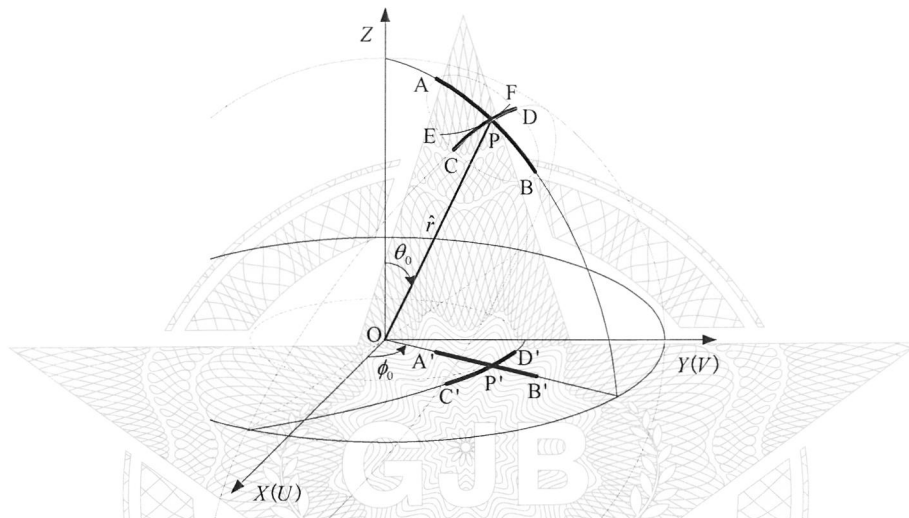


图 B.1 主平面扫描示意图

主平面 1 扫描为弧 CPD 大圆切割, 主平面扫描的主平面 2 为弧 APB 大圆切割, 两个主平面正交于 (θ_0, ϕ_0) 方向。

设主平面 1 扫描步进角度为 δ_1 , 其上第 n 个扫描点方向的计算方法见公式 (B.1)。

$$\begin{cases} \theta_n = \arccos(\cos\theta_0 \cos n\delta_1) \approx \theta_0 \\ \phi_n = \phi_0 + \arcsin \frac{\sin n\delta_1}{\sqrt{(\cos n\delta_1 \sin\theta_0)^2 + \sin^2 n\delta_1}} \approx \phi_0 + \frac{n\delta_1}{\sin\theta_0} \end{cases} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

(θ_n, ϕ_n) ——主平面 1 上第 n 个扫描点位的球坐标向量, rad;

(θ_0, ϕ_0) ——参考轴球坐标向量, rad;

n ——主平面 1 上的扫描点位序号;

δ_1 ——主平面 1 扫描步进角度, rad。

公式 (B.1) 中的近似关系仅当 $n\delta_1$ 很小时成立。

主平面 2 扫描步进角度为 δ_2 , 其上第 m 个扫描点方向的计算方法见公式 (B.2)。

$$(\theta_m, \phi_m) = (\theta_0, \phi_0) + (m\delta_2, 0) \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

(θ_m, ϕ_m) ——主平面 2 上第 m 个扫描点位的球坐标向量, rad;

m ——主平面 2 上的扫描点位序号;

δ_2 ——主平面 2 扫描步进角度, rad。

附 录 C
(资料性附录)

方向图函数的 Gaussian 拟合

在轨测试取得的方向图实测数据一般以 dBm 或 dBW 为单位，记为 $G_{\text{dB}}(\theta)$ ，其中 $\theta=0^\circ$ 为参考轴方向。对于具有单一主瓣的天线波束，其方向图函数 $G_{\text{dB}}(\theta)$ 的真值可使用 Gaussian 函数拟合，并有公式 (C.1) 成立。

$$10^{G_{\text{dB}}(\theta)/10} \approx a \exp(-(b(\theta-c))^2) \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

G_{dB} ——方向图实测数据，dBm 或 dBW；

θ ——偏离波束参考轴的角度，(°)；

a ——待定常数；

b ——待定常数；

c ——待定常数。

使公式 (C.1) 成立的待定常数 c 即为所测试切面内电轴偏离参考轴的角度(指向误差分量)。

附录 D
(资料性附录)
装星误差矩阵实测值的计算

卫星本体坐标系与天线机械坐标系的坐标变换关系如公式(D.1)所示。

$$[\hat{X}_A \ \hat{Y}_A \ \hat{Z}_A]^T = \mathbf{T}_{S2A} [\hat{X} \ \hat{Y} \ \hat{Z}]^T \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

- \hat{X} ——卫星本体坐标系 X 轴单位矢量；
- \hat{Y} ——卫星本体坐标系 Y 轴单位矢量；
- \hat{Z} ——卫星本体坐标系 Z 轴单位矢量；
- \hat{X}_A ——天线机械坐标系 X_A 轴单位矢量；
- \hat{Y}_A ——天线机械坐标系 Y_A 轴单位矢量；
- \hat{Z}_A ——天线机械坐标系 Z_A 轴单位矢量；
- \mathbf{T}_{S2A} ——装星误差矩阵，初值一般在地面标定或设为 3 阶单位矩阵；
- T ——矩阵转置符号。

在理想情况下， \mathbf{T}_{S2A} 为 3 阶单位矩阵；当天线装星环节产生装配误差时， \mathbf{T}_{S2A} 反映了具体的偏差情况。

当可移波束天线波束指向 N 个不同的参考轴方向时，标定得到相应的 N 个电轴方向 ($N \geq 3$)。使用公式(D.2)构建两个矩阵。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{r}_N \end{bmatrix}, \mathbf{R}' = \begin{bmatrix} \mathbf{r}'_1 \\ \mathbf{r}'_2 \\ \vdots \\ \mathbf{r}'_N \end{bmatrix} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

- \mathbf{R} ——参考轴矩阵；
- \mathbf{r} ——参考轴直角坐标向量；
- \mathbf{R}' ——电轴矩阵实测值；
- \mathbf{r}' ——电轴直角坐标向量实测值。

使用公式(D.3)计算装星误差矩阵实测值。

$$\mathbf{T}'_{S2A} \approx (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{R}^T \mathbf{R}') \dots\dots\dots (D.3)$$

式中：

- \mathbf{T}'_{S2A} ——装星误差矩阵实测值。

中华人民共和国
国家军用标准
导航卫星星载可移波束天线在轨指向
标校方法

GJB 11648—2024

*

国家军用标准出版发行部出版
(北京东外京顺路7号)
国家军用标准出版发行部印刷车间印刷
国家军用标准出版发行部发行
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 1½ 字数 40 千字
2025 年 2 月第 1 版 2025 年 2 月第 1 次印刷

*

军标出字第 16576 号