BD

中国第二代卫星导航系统重大专项标准

BD 210011-2022

北斗星载 Ka 相控阵天线加速寿命试验方法

Accelerated life test method for BDS satellite Ka phased array antenna

2022-08-01 发布 2022-09-01 实施

中国卫星导航系统管理办公室 批准

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 试验目的 1
5 试验原理 1
6 试验准备 1
6.1 试验环境 1
6.2 试验设备 2
6.3 试验件 2
6.4 试验件安装 2
6.5 试验操作 2
6.6 试验文件 2
7 加速寿命试验条件 2
8 试验程序 3
8.1 全面性能测试 3
8.2 达标试验 3
8.3 全面性能测试 3
8.4 摸底试验 4
9 试验数据处理 4
9.1 试验过程监测数据 4
9.2 试验结果数据评判 5
10 试验中断及处理 5
10.1 试验中断 5
10.2 试验中断处理 5
11 试验总结 5
附录 A（资料性附录）相控阵天线整机加速寿命试验示例 7
附录 B（资料性附录）相控阵天线射频链路加速寿命试验示例 10

前　　言

本标准的附录A、附录B为资料性附录。

本标准由中国卫星导航系统管理办公室提出。

本标准由全国北斗卫星导航标准化技术委员会（SAC/TC 544）归口。

本标准起草单位：中国航天标准化研究所、西安空间无线电技术研究院、中国电子科技集团第二十九研究所、国防科技大学。

本标准主要起草人：郑紫霞、杨　鹏、程海龙、张　锐、汪亚顺、李若昕、郑　恒、王晋婧、王小宁、龙东腾、龚佩佩、周　波、角淑媛、冉迎春、申　林。

.

北斗星载 Ka 相控阵天线加速寿命试验

1 范围

本标准制定了北斗星载Ka相控阵天线加速寿命试验方法，规定了试验目的、试验原理、试验条件、试验程序、试验数据处理等内容。

本标准适用于北斗星载Ka相控阵天线加速寿命试验，也适用于其他影响Ka相控阵天线寿命的、具有耗损特性的关键器部件加速寿命试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包含勘误的内容）或修订版均不适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 2689.1 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则

GB/T 39267 北斗卫星导航术语

GJB 451 可靠性维修性保障性术语

GJB 1649 电子产品防静电放电控制大纲

3 术语和定义

GB/T 39267、GB/T 2689.1 和GJB 451确立的术语和定义适用于本标准。

4 试验目的

在不改变产品失效机理的前提下，通过施加应力，在较短的时间内验证 Ka 相控阵天线的工作寿命；

5 试验原理

采用阿伦尼斯加速试验模型，以温度应力为加速应力，模拟在轨工况，开展星载Ka相控阵天线加速寿命试验。

6 试验准备

6.1 试验环境

除特殊规定外，试验环境条件一般应满足如下要求：

a） 温度：（15~25）℃；

b）相对湿度：30%~55%；

c）气压：试验室气压；

d）洁净度：优于100000级。

6.2 试验设备

试验及测试设备一般要求如下：

a）试验设备为温箱，温度范围满足测试要求；

b）测试仪器应经计量部门检定合格，并在有效期内；

c）测试仪器应满足测试精度的要求，测试仪器的精度至少应为被测参数容差的三分之一。

6.3 试验件

Ka相控阵天线加速寿命试验对试验件技术状态要求如下：

a）试验件技术状态应与北斗系统正样产品技术状态保持一致；

b）试验件应从已经通过验收试验的不同批次产品中随机选取，应多于1件，从而避免不同产品的偶然性失效。

6.4 试验件安装

被测件安装应与实际工作状态接近，安装方式不改变其热边界条件和测试设备的状态。

6.5 试验操作

测试过程中，应对试验件进行必要的保护，操作过程中应佩戴防静电手镯，穿着防静电衣物。试验过程中应符合GJB 1649 的相关要求。

6.6 试验文件

试验前，制定相关试验文件，包括试验大纲、试验细则等。

7 加速寿命试验条件

a) 温度选取：温度选取应遵循加速寿命试验原则，根据Ka相控阵天线实际在轨工作温度，考虑试验件中各核心部组件能承受的最高温度，在不引起新的失效机理前提下，选取试验件的高温加速寿命试验温度。

当试验件是相控阵天线整机时，试验温度选取应根据相控阵天线实际工作温度、热仿真分析等条件，并结合相控阵天线核心部组件等薄弱环节的元器件工作、失效温度，综合评估出相控阵天线整机的试验温度条件。整机试验温度以相控阵天线热沉面（热交换面）为参考温度面，可以设立不少于2个参考温点，试验温度为各参考测温点温度平均值，整机试验温度选取参见附录A.1；

当试验件是相控阵射频模块时，以TR组件、预放组件的测温点中的最高温度作为控温依据，同时设立不少于2个参考测温点，测温点应远离发热源，射频链路试验温度选取见资料性附录A.2。

b）温度稳定判据：参考测温点温度平均值达到规定试验温度允差范围内，如果前1小时中平均值变化率≤1℃/h，则认为试验件已达到温度稳定，可以开始温度保持计时。

c）激活能选取：可基于可靠性预计估计方法，通过比较工作环境温度与加速寿命试验温度下的失效率数据，估计寿命试验加速因子，从而确认激活能值。

d）试验时间确定：根据试验产品在轨工作寿命要求、在轨工作温度条件（通过仿真或遥测数据得到），依据确定的试验温度、激活能，按照阿伦尼兹寿命模型计算，得到试验产品的加速寿命试验时间。

8 试验程序

Ka相控阵天线加速寿命试验分为达标试验与摸底试验两个阶段，达标试验为考核阶段，考核产品是否满足设计寿命要求；摸底试验是在达标试验的基础上开展，旨在得到产品的最长寿命。具体试验步骤如下。

图 1 寿命试验流程图

8.1 全面性能测试

在加速寿命试验开始前，在常温（15～25）℃条件下、暗室里进行全面性能测试，并按资料性附录里的相应格式记录试验数据。

8.2 达标试验

将试验件放置于高温试验设备中，将试验件温度升至加速寿命试验温度T，待温度稳定后达标试验阶段加速寿命试验开始，试验件按照在轨工作状态工作，并按照试验细则里规定的时间定期进行试验数据记录。

8.3 全面性能测试

在完成t_1时间的加速寿命试验后，将温度回到常温（15～25）℃，温度稳定后，再次进行全面性能测试。

加速寿命试验时间t_1的计算见公式（1）：

$$t_1 = \frac{q_2 t_0}{q_1} \quad \text{……（1）}$$

q_2/q_1：加速因子；

q_2：温度T下不引入额外失效率的寿命参数值；

q_1：温度T_1下的寿命参数值；

t_1: 达标试验阶段试验时间，单位为小时（h）；

t_0: 产品设计寿命，单位为小时（h）。

其中，加速因子的计算见公式（2）：

$$\frac{q_2}{q_1}=e^{\frac{E_A}{k}(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T})} \quad \cdots\cdots（2）$$

E：激活能；

K：波尔兹曼常数；

e：自然对数的底；

T_1: 产品实际工作温度；

T: 产品加速寿命试验温度。

8.4 摸底试验

按照第一阶段的温度量级继续试验直至试验件失效或达到一定的时间，具体步骤如下：

a）将试验件放置于高温试验设备中，将温度升至加速寿命试验温度T，待温度稳定后第二阶段加速寿命试验开始，试验过程中需要定期对试验数据进行记录；

b）当试验件失效，记录试验件第二阶段试验时间t_2，加速寿命试验总时间为t_1+t_2，按照加速因子计算得到产品最长使用寿命t，见公式（3）：

$$t=\frac{(t_1+t_2)q_1}{q_2} \quad \cdots\cdots（3）$$

q_2/q_1：加速因子；

q_2：温度T下不引入额外失效率的寿命参数值；

q_1：温度T_1下的寿命参数值；

t_1：达标试验阶段试验时间，单位为小时（h）；

t_2：摸底试验阶段试验时间，单位为小时（h）。

t：产品最长使用寿命，单位为小时（h）。

c) 若摸底试验中试验件一直未发生失效，则当试验件加速寿命试验总时间（达标试验与摸底试验时间之和）大于2倍等效在轨寿命时间时，试验结束。

9 试验数据处理

9.1 试验过程监测数据

监测、记录测试数据并绘制成参数随时间的变化曲线，对于异常数据应给出对应的时间和状态，出现异常数据应突出显示，测试人员定期判读试验状态。

以Ka相控阵天线整机加速寿命试验为例，指标超差判据如下：

a）发射通道失效数量大于总通道数量的10%；

b）接收通道失效数量大于总通道数量的10%；

c）单通道发射输出功率退化大于1dB；

d）单通道接收增益退化大于1dB。

其他Ka相控阵天线关键器部件加速寿命试验指标超差判据各实验组需按实际情况分析确定，其中射频链路部分指标查查判据见资料性附录B。

9.2 试验结果数据评判

按照试验方案规定的测试项目对试验件进行全面性能测试，数据记录后由Ka相控阵天线设计人员进行正确性判读，全面性能测试数据作为试验过程中测试数据正确性判读的基准。

10 试验中断及处理

10.1 试验中断

Ka相控阵天线进行达标试验或摸底试验，当发生如下（不局限于以下几种情况）等异常情况时可能需要进行试验中断或终止。

a）失效通道数＞总试验通道数的10%；

b）无射频信号输出；

c）射频信号波动，超过预定值范围；

d）温度异常，超过预定值范围；

e）电流异常，超过预定值范围；

f）电压异常，超过预定值范围；

g）遥测异常，超过预定值范围；

h）天线测试场景变化，如吸波箱、热试验工装固定有异常，影响产品安全等；

10.2 试验中断处理

当测试有上述异常现象时，测试人员需要及时联系设计人员，进行考核判读是否进行中断测试，是否中断测试的主要判据是区分产品相关故障和非相关故障，如是与产品性能异常的非相关故障，则不应中断试验，如果非相关故障导致试验异常终止，在非相关故障解决后，经分析后认为对试验件不造成损伤，性能满足使用要求，试验条件应重新设置或控制，在中断点处继续试验。

11 试验总结

应在试验过程中形成试验数据包，包含试验数据及图表。按照试验方案结合试验数据分析给出试验件的寿命预测值。

附　录　A

（资料性附录）

相控阵天线整机加速寿命试验示例

A.1 试验温度选取

某Ka相控阵天线根据热分析、热试验结果，整机热交换面温度在+65℃，以此作为温箱初始设定温度，启动温度试验，经过2个循环，得到如下数据：

a）整机热交换面温度为63℃，即温差2℃

b）温箱设备自身温度波控约0.5℃；

c）整机工作时温度波动约2℃；

综合上述数据，为保证加速寿命试验过程中相控阵天线始终处于+65℃以上，因此温箱试验温度设定为69.5℃。

该Ka相控阵天线已完成4000小时的加速寿命试验，其中试验温箱温度设定为70℃。从试验数据分析情况看，相控阵天线试验正常，达到寿命试验验证目的，表明该相控阵天线加速寿命试验温度选取合理，满足试验要求。

A.2 试验激活能选取

某Ka相控阵天线根据其组成特点及核心部组件分析，依据美国及欧空局的标准ECSS-Q-30-1(2002)给出的典型材料激活能值，结合GJB/Z 299C-2006《电子设备可靠性预计手册》和MIL-HDBK-217F《电子设备可靠性预计》，评估相控阵天线的加速寿命试验的加速因子，从而得到相控阵天线加寿命试验激活能值为0.89。

考虑到影响相控阵天线可靠性预计的因素较多，同时相控阵天线内部组成复杂、选用材料较多，激活能参数选取应该尽量保守，结合相关组件寿命试验数据，综合考虑后相控阵天线激活能值选取为 0.85eV。

该Ka相控阵天线已完成4000小时的加速寿命试验，从试验数据分析情况看，相控阵天线试验正常，达到寿命试验验证目的，表明该相控阵天线加速寿命试验激活能选取合理，满足试验要求。

A.3 试验环境搭建

相控阵天线与标准天线整机置于试验温箱内，在指示天线后端放置小型吸波箱，调试计算机控制相控阵天线处于发射-接收的正常工作模式下切换，联动控制矢量网络分析仪收发切换，并记录相应数据。试验设备连接框图示例如图A.1所示。

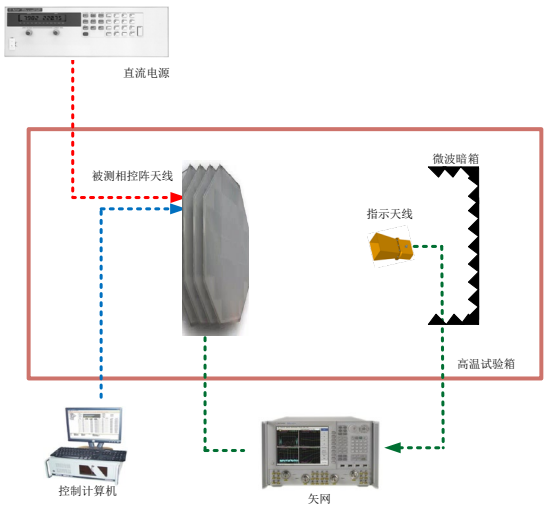

图 A.1　Ka 相控阵天线加速寿命试验设备连接框图示例

A.4 试验步骤

根据Ka相控阵天线正常工作特点，按照系统要求连续地进行收发工作模块切换。为了同时兼顾加速寿命试验连续性、有效性与试验数据量，每隔24小时进行一次通道测量，记录所有通道的发射、接收状态下的幅度与相位值，直至完成4000小时的加速寿命试验。该相控阵天线加速寿命试验流程图示例如图A.2所示。

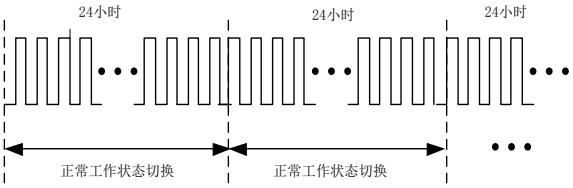

图 A.2　Ka 相控阵天线加速寿命试验流程图示例

A.5 指标超差判据

Ka相控阵天线整机加速寿命试验指标超差判据如下：

a）发射通道失效数量大于总通道数量的10%；

b）接收通道失效数量大于总通道数量的10%；

c）单通道发射输出功率退化大于1dB；

d）单通道接收增益退化大于1dB。

A.6 试验数据记录

试验过程中数据记录示例如图A.3和A.4所示。

序号	EIRP 测试项目		G/T 项目	
1	工作频点（MHz）		工作频点（MHz）	
2	P_{e1} （dBm）		C1（dBm）	
3	P_{e2} （dBm）		C2（dBm）	
4	P_e （dBm）		C（dBm）	
5	距离（m）		N（dBm）	
6	空间损耗（dB）		距离（m）	
7	喇叭天线增益（dB）		空间损耗 La（dB）	
8	线损（dB）		喇叭天线增益 Gt（dB）	
9	EIRP（dBm）		线损 Ll（dB）	
10			信号源输出功率 Pg（dBm）	
11			积分带宽 BW（Hz）	
12			G/T（dB/K）	

图 A.3　Ka 相控阵天线整机加速寿命试验全面测试数据记录表示例

	第 XX 小时 试验温度（__℃）		…		第 XX 小时 试验温度（__℃）		是否失效 （Y/N）
通道号	幅度 （dB）	相位 （°）	幅度 （dB）	相位 （°）	幅度 （dB）	相位 （°）	
1							
2							
…							

图 A.4　高温试验中通道幅相数据记录示例

附　录 B
（资料性附录）
相控阵天线射频链路加速寿命试验示例

B.1 试验温度选取

Ka相控阵天线射频有源链路包含天线单元、TR组件、预放组件和波控配电网络子板，试验温度应综合考虑各部组件的最高承受温度。其中天线单元为无源结构件，不含元器件；TR组件和预放组件为射频模块，包含GaAs芯片、陶瓷片、LTCC基板等射频器件，而TR组件包含元器件种类较多，包括混合集成电路(射频微波器件)、半导体分立器件、半导体集成电路等，材料和工艺种类多，模块集成度高，收发放大多功能芯片功耗热耗大，是射频有源链路功能和性能的源头和决定性因素，是寿命试验中重点考虑对象。波控配电网络子板由无源公分网络和数字电路组成，本身功耗小热耗小。波控配电网络子板和预放组件在轨壳体温度最高为+10~+15℃，TR组件在轨工作壳体温度最高为+20~+25℃，为保证试验的安全性及最大加速因子，射频有源链路的高温加速温度为+75℃，等效试验时间为4000小时开展加速寿命试验。

B.2 试验环境搭建

试验框图如图B.1所示。被测件置于高低温箱中，被测件通道1~8与开关矩阵1~8连接进行有线射频回路试验，用于测试和监测寿命试验过程中射频有源链路性能，被测件通道9~16连接天线阵面，通过三个测试探头测试和监测天线波束无线性能，测试探头分别与开关矩阵9~11连接。多通道开关矩阵与矢量网络分析仪连接，矢量网络分析仪作为激励源输出射频信号，送入开关矩阵中，开关矩阵自动切换将射频激励信号送入待测多通道的收发公共端口，然后利用矢量网络分析仪接收机测量有源链路通道的发射幅相数据并进行自动采集。通过外部RTC实时控制模块协调控制各个测试设备，使用RTC控制器为遥控遥测子系统发送切换指令；遥控遥测设备可与寿命试验件内部模块进行通信，实现对寿命试验件工作状态、移相衰减以及波位等的控制，同时实时接收被测件返回的遥测数据；系统程控电源为寿命试验件提供工作所需的直流供电并可实时监测其电压与电流；温度数据由用户负责测试并提供测试数据，系统具备相应接口进行数据读取。

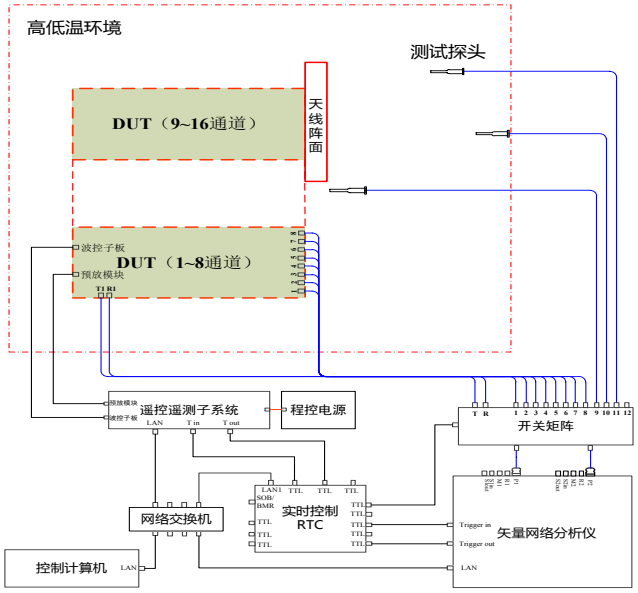

图 B.1　Ka 相控阵天线加速寿命试验设备连接框图示例

B.3 试验步骤

在加速寿命试验开始前，进行全面性能测试；试验过程中每1000小时进行一次阶段性测试，在4000小时加速寿命试验后进行6个高低温循环试验，目的是测试天线波束性能在高低温下的性能变化；加速寿命试验完成后，进行全面性能测试；进行寿命摸底试验。寿命试验流程曲线如图B.2所示。

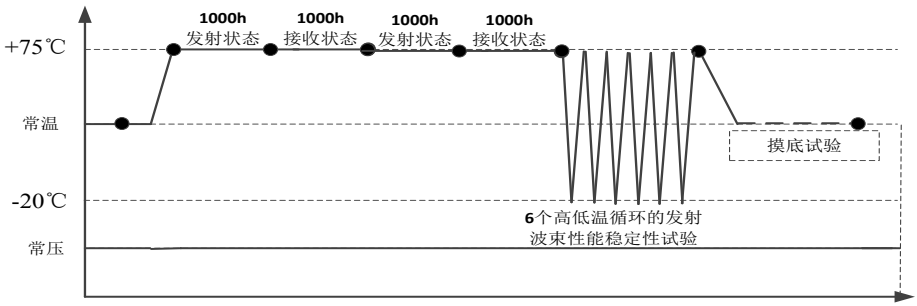

图 B.2　寿命试验流程图

B.4 指标超差判据

Ka相控阵天线射频链路加速寿命指标超差判据如下：

1）发射输出功率连续24h内输出功率变化大于±0.5dB；

2）接收增益连续24h内线性增益变化大于±0.5dB；

3）相位连续24h内相位变化大于±10°；

4）功耗连续24h内变化应大于10%。

B.5 试验数据记录

试验过程中数据记录示例如图B.3所示。

测试状态: 测量人: 测量时间:						
通道号	发射输出功率	发射相位	接收增益	接收相位	通道状态	备注
1#通道						
2#通道						
3#通道						
…						
XX#通道						
	测温点 XX	测温点 XX	测温点 XX	测温点 XX	试验温度	参考温度
温度遥测						
	XXV	XXV	XXV	XXV	XXV	备注
电压电流遥测						
	移相衰减	带内起伏	带外抑制	发射 1dB 压缩点	驻波比	合成波束性能
1#通道						
2#通道						
3#通道						
…						
XX#通道						

图 B.3 Ka 相控阵天线寿命试验全面测试数据记录表示例

测试状态: 测量人: 测量时间:						
通道号	发射输出功率	发射相位	接收增益	接收相位	通道状态	备注
有线 1#通道						
有线 2#通道						
有线 3#通道						
…						
XX#通道						
	测温点 XX	测温点 XX	测温点 XX	测温点 XX	试验温度	参考温度
温度遥测						
	XXV	XXV	XXV	XXV	XXV	备注
电压电流遥测						

图 B.4 Ka 相控阵天线寿命试验测试与监测数据记录表示例