

ICS 33.060.20

CCS M 36



团 体 标 准

T/CEATEC XXX—2026

低轨卫星通信相控阵 T/R 芯片核心性能要求与测试方法

Low-earth-orbit satellite communication phased-array t/r chip core
performance requirements and test methods

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 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 核心性能要求	2
4.1 工作频率	2
4.2 发射性能	2
4.3 接收性能	2
4.4 移相性能	3
4.5 幅相一致性	3
4.6 开关性能	3
4.7 电源性能	4
4.8 环境适应性	4
4.9 电磁兼容性	4
5 测试条件	5
5.1 环境条件	5
5.2 电源条件	5
5.3 测试设备	5
5.4 测试连接与安装条件	5
5.5 预处理条件	5
6 测试方法	6
6.1 工作频率测试	6
6.2 发射性能测试	6
6.3 接收性能测试	6
6.4 移相性能测试	7
6.5 幅相一致性测试	7
6.6 开关性能测试	7
6.7 电源性能测试	7
6.8 环境适应性测试	8
6.9 电磁兼容性测试	8
7 数据处理与结果判定	8
7.1 一般要求	8
7.2 误差处理	8
7.3 结果判定	8
7.4 测试记录	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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

低轨卫星通信相控阵 T/R 芯片核心性能要求与测试方法

1 范围

本文件规定了低轨卫星通信相控阵T/R芯片的核心性能要求、测试条件、测试方法以及数据处理与结果判定。

本文件适用于工作频率范围为1GHz~50GHz的低轨卫星通信相控阵T/R芯片的设计验证、性能测试及质量评价。

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 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）

GB/T 2423.27 环境试验 第2部分：试验方法 试验方法和导则：温度/低气压或温度/湿度/低气压综合试验

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 17626.2 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验

GB/T 17626.6 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度

GB/T 42968.9 集成电路 电磁抗扰度测量 第9部分：辐射抗扰度测量 表面扫描法

GB/T 46132 空间环境 航天材料空间辐射效应试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

T/R 芯片 transmit/receive chip

用于相控阵天线系统中射频信号收发调节的集成器件，包含发射功率放大器、接收低噪声放大器、相位控制单元及幅度调节模块。

3.2

相控阵 phased array

通过控制各T/R单元的相位，实现电子扫描和波束方向控制的天线阵列。

3.3

噪声系数 noise figure

T/R芯片接收支路输入信噪比与输出信噪比的比值，通常以dB表示，反映芯片接收微弱信号的能力。

3.4

幅相一致性 amplitude-phase consistency

多通道T/R芯片在相同控制条件下，各通道之间幅度和相位的一致程度，包括幅度一致性和相位一致性。

4 核心性能要求

4.1 工作频率

T/R芯片应覆盖低轨卫星通信常用频段，具体要求见表1。

表1 T/R芯片工作频率要求

指标	要求	备注
常规频段	1GHz~20GHz	频率偏差 $\leq\pm 0.5\%$
高频段	20GHz~50GHz	频率偏差 $\leq\pm 0.3\%$
带内增益波动	$\leq 1.5\text{dB}$	整个工作频段内

4.2 发射性能

4.2.1 发射增益

T/R芯片在额定工作电压和温度条件下的发射增益及增益调节要求见表2。

表2 T/R芯片发射增益要求

频段	最低增益 (db)	增益平坦度 (db)	调节范围 (db)	调节步长 (db)	调节精度 (db)
1GHz~10GHz	≥ 15	± 1.0	0~30	≤ 1	± 0.5
10GHz~30GHz	≥ 12	± 1.2	0~30	≤ 1	± 0.5
30GHz~50GHz	≥ 10	± 1.5	0~30	≤ 1	± 0.5

4.2.2 输出功率

T/R芯片在额定工作条件下的输出功率及抑制指标见表3。

表3 T/R芯片输出功率要求

频段	额定输出功率 (dBm)	峰值输出功率 (dBm)	谐波抑制 (dBc)	杂散抑制 (dBc)
1GHz~10GHz	≥ 20	≥ 25	≤ -40	≤ -50
10GHz~30GHz	≥ 18	≥ 23	≤ -38	≤ -48
30GHz~50GHz	≥ 15	≥ 20	≤ -35	≤ -45

4.2.3 发射效率

T/R芯片在额定输出功率下，发射效率应满足不同频段的最低要求，具体要求见表4。

表4 T/R芯片发射效率要求

频段	最低效率 (%)
1GHz~10GHz	≥ 45
10GHz~30GHz	≥ 40
30GHz~50GHz	≥ 35

4.3 接收性能

4.3.1 接收增益

T/R芯片接收支路的增益及增益调节要求见表5。

表5 T/R芯片接收增益要求

频段	最低增益 (db)	增益平坦度 (db)	调节范围 (db)	调节步长 (db)	调节精度 (db)
1GHz~10GHz	≥ 20	± 1.0	0~30	≤ 1	± 0.5
10GHz~30GHz	≥ 18	± 1.2	0~30	≤ 1	± 0.5

30GHz~50GHz	≥ 15	± 1.5	0~30	≤ 1	± 0.5
-------------	-----------	-----------	------	----------	-----------

4.3.2 噪声系数

T/R 芯片接收支路在额定工作条件下的噪声系数及波动要求见表6。

表6 T/R芯片噪声系数要求

频段	最大噪声系数 (dB)	波动范围 (dB)
1GHz~10GHz	≤ 2.5	≤ 0.5
10GHz~30GHz	≤ 3.0	≤ 0.5
30GHz~50GHz	≤ 3.5	≤ 0.5

4.3.3 输入驻波比

T/R芯片接收输入端的驻波比应符合表7的规定。

表7 T/R芯片输入驻波比要求

频段	最大值
1GHz~10GHz	≤ 1.5
10GHz~30GHz	≤ 1.6
30GHz~50GHz	≤ 1.8

4.3.4 线性度

T/R芯片接收支路的线性度以三阶交调截点 (IP3) 表示, 其最低要求见表8。

表8 T/R芯片接收线性度要求

频段	最低IP3 (dBm)
1GHz~10GHz	≥ 25
10GHz~30GHz	≥ 22
30GHz~50GHz	≥ 20

4.4 移相性能

T/R芯片内置移相器的性能要求见表9。

表9 T/R芯片移相性能要求

指标	要求
移相范围	$0^\circ \sim 360^\circ$
移相步长 $\leq 11.25^\circ$	精度 $\leq \pm 1^\circ$
同芯片通道移相一致性	$\leq \pm 0.8^\circ$
不同芯片间移相一致性	$\leq \pm 1.2^\circ$
移相速度	$\leq 10\text{ns/步}$

4.5 幅相一致性

对于多通道T/R芯片, 其各通道间幅度和相位的一致性应满足阵列波束合成要求, 并在规定温度范围内保持稳定, 具体要求见表10。

表10 多通道幅相一致性要求

指标	同芯片通道间	不同芯片间	温度稳定性 ($-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$)
幅度一致性	$\leq \pm 0.5\text{dB}$	$\leq \pm 0.8\text{dB}$	$\leq \pm 0.3\text{dB}$
相位一致性	$\leq \pm 1.0^\circ$	$\leq \pm 1.5^\circ$	$\leq \pm 0.5^\circ$

4.6 开关性能

T/R芯片在发射与接收模式之间切换时，应具备快速响应能力和良好的通道隔离性能，其开关特性应符合表11的规定。

表11 T/R芯片开关性能要求

指标	数值	备注
发射→接收切换时间	≤100ns	模式切换时间
接收→发射切换时间	≤100ns	模式切换时间
隔离度（发射模式）	≥60dB	接收支路隔离
隔离度（接收模式）	≥60dB	发射支路隔离
开关抖动	≤10ns（峰-峰）	时间稳定性

4.7 电源性能

T/R芯片在额定工作条件下，其电源电压范围、功耗及电源抑制能力应满足系统稳定运行要求，具体指标见表12。

表12 T/R芯片电源要求

参数	数值
数字部分工作电压	3.3V±0.1V
模拟部分工作电压	5V±0.2V
功率放大部分工作电压	12V±0.5V
功耗（发射模式）	≤2.5W/通道
功耗（接收模式）	≤0.8W/通道
功耗（待机模式）	≤50mW/通道
电源抑制比（PSRR）	≥60dB

4.8 环境适应性

4.8.1 温度适应性

T/R芯片应能在-40℃~+85℃条件下正常工作。

4.8.2 湿度适应性

T/R芯片应能在相对湿度5%~95%（无凝露）条件下正常工作。

4.8.3 振动适应性

T/R芯片应能承受频率范围10Hz~2000Hz、加速度不低于5g的振动条件，且在该振动条件下不应出现结构损伤或性能异常。

4.8.4 抗辐射性能

T/R芯片应具备一定的抗辐射能力，总剂量辐射应不低于100krad（Si），辐射后性能指标偏差不应超过20%；单粒子翻转阈值应不低于80MeV·cm²/mg，且不应出现单粒子锁定现象。

4.9 电磁兼容性

4.9.1 电磁发射

T/R芯片在正常工作状态下产生的电磁发射应满足下列要求：

a) 传导发射在150kHz~30MHz频率范围内不应超过40dB μV/m；

b) 辐射发射在30MHz~1GHz频率范围内不应超过30dB μV/m，在1GHz~10GHz频率范围内不应超过35dB μV/m。

4.9.2 电磁抗扰度

T/R芯片的电磁抗扰能力应满足下列要求：

a) 传导抗扰度在150kHz~30MHz频率范围内不低于20dB μV；

b) 辐射抗扰度在30MHz~1GHz频率范围内不应低于30V/m，在1GHz~10GHz频率范围内不应低于20V/m。

4.9.3 静电放电抗扰度

T/R芯片应具备静电放电抗扰能力，在接触放电不低于2kV、空气放电不低于4kV条件下，不应出现功能失效或性能异常。

5 测试条件

5.1 环境条件

除特殊规定外，测试环境条件应满足下列要求：

- a) 环境温度：23℃±2℃；
- b) 相对湿度：45%~75%；
- c) 大气压力：86kPa~106kPa；
- d) 测试环境应无明显振动、冲击及强电磁干扰；
- e) 测试区域应具备良好的电磁屏蔽条件或在屏蔽环境下进行。

5.2 电源条件

T/R芯片测试时所施加的电源应满足下列要求：

- a) 数字电源电压：3.3V±0.1V；
- b) 模拟电源电压：5V±0.2V；
- c) 功率放大电源电压：12V±0.5V；
- d) 电源纹波电压：不大于10mV（rms）；
- e) 电源稳定度：不大于±0.5%；
- f) 电源应具备过压、过流保护功能。

5.3 测试设备

测试所用仪器设备应满足精度要求，并在有效校准周期内，主要设备及要求如下：

- a) 矢量网络分析仪（VNA）：频率范围应覆盖1GHz~50GHz，幅度测量误差不应大于±0.5dB，相位误差不应大于±2°；
- b) 频谱分析仪：频率范围应覆盖0.1GHz~100GHz，幅度误差不应大于±1.0dB；
- c) 信号源：频率范围应覆盖1GHz~50GHz，频率稳定度优于±1×10⁻⁶；
- d) 功率计及功率探头：测量范围应覆盖-30dBm~+40dBm，测量误差不应大于±0.5dB；
- e) 噪声系数分析仪或等效测试系统：测量误差不应大于±0.3dB；
- f) 示波器：带宽不应低于1GHz；
- g) 相位噪声测试仪或等效系统；
- h) 恒温恒湿箱：温度范围-55℃~+125℃，控制精度±1℃；
- i) 振动试验台：频率范围10Hz~2000Hz；
- j) 辐射试验设备（如需）：应满足规定辐射剂量要求。

5.4 测试连接与安装条件

测试连接与安装条件如下：

- a) T/R芯片应安装于标准测试电路板或专用测试夹具中；
- b) 射频端口应采用50Ω标准阻抗匹配；
- c) 连接电缆及连接器应满足测试频率范围要求，并进行校准补偿；
- d) 测试系统应进行全链路校准（如SOLT或TRL校准）；
- e) 多通道测试时，各通道测试路径应保持一致；
- f) 测试过程中应避免因连接不良或寄生参数引入附加误差。

5.5 预处理条件

测试前应按照以下要求进行预处理：

- a) T/R芯片在测试前应在标准环境条件下静置不少于30min；
- b) 通电预热时间不应少于10min；

- c) 在进行高低温或湿热测试后，应恢复至标准环境条件再进行性能测试；
- d) 测试前应确认芯片工作状态正常，无异常报警或失效现象。

6 测试方法

6.1 工作频率测试

应按照以下步骤进行：

- a) 将矢量网络分析仪（VNA）按全双端口方式连接至芯片输入端和输出端；
- b) 对测试系统进行全频段校准（如SOLT校准），校准范围覆盖1GHz~50GHz；
- c) 设置频率扫描范围，步进不大于50MHz；
- d) 测量传输参数S21，记录增益随频率变化曲线；
- e) 确定增益下降3dB的上下限频率，作为工作频率范围；
- f) 计算频带内最大增益与最小增益差值，得到带内波动。

6.2 发射性能测试

6.2.1 发射增益

应按照以下步骤进行：

- a) 将信号源连接至芯片输入端，输出端连接功率计或VNA；
- b) 设定输入信号为小信号，逐频点扫描；
- c) 在各测试频点记录输入功率和输出功率；
- d) 计算增益，增益为输入功率与输出功率之差；
- e) 统计整个频段内的最大值和最小值，计算增益平坦度。

6.2.2 输出功率

应按照以下步骤进行：

- a) 保持频率不变，逐步提高输入信号功率（步进0.5dB）；
- b) 记录输出功率随输入功率变化曲线；
- c) 确定输出功率下降1dB对应点，作为 P_{1dB} ；
- d) 继续增加输入功率，记录输出趋于饱和时的最大输出功率（ P_{sat} ）；
- e) 使用频谱分析仪测量基波、谐波及杂散信号幅度。

6.2.3 发射效率

应按照以下步骤进行：

- a) 在额定工作状态下测量射频输出功率 P_{out} ；
- b) 同时测量电源电压和电流，计算直流输入功率 P_{dc} ；
- c) 按公式（1）计算发射效率：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

- η ——发射效率，单位为%；
- P_{dc} ——输入功率，单位为W；
- P_{out} ——输出功率，单位为W。

6.3 接收性能测试

6.3.1 接收增益

应按照以下步骤进行：

- a) 将标准信号源连接至芯片输入端，输出端连接功率计或VNA；
- b) 设置输入信号为稳定小信号；
- c) 逐频点测量输出功率；
- d) 计算接收增益并统计平坦度。

6.3.2 噪声系数

应按照以下步骤进行：

- a) 将标准噪声源接入芯片输入端；
- b) 输出端连接噪声系数分析仪；
- c) 分别测量噪声源开/关状态下的输出功率；
- d) 根据仪器自动计算或按定义计算噪声系数；
- e) 在多个频点重复测量并记录波动。

6.3.3 输入驻波比

应按照以下步骤进行：

- a) 使用VNA单端口模式连接芯片输入端；
- b) 进行端口校准；
- c) 测量反射参数S11；
- d) 根据公式（2）计算驻波比：

$$VSWR = \frac{1 + |S11|}{1 - |S11|} \quad (2)$$

式中：

$VSWR$ ——驻波比；

$S11$ ——反射参数。

6.3.4 线性度

应按照以下步骤进行：

- a) 使用双音信号源产生两个相邻频率信号；
- b) 将信号输入芯片，输出端连接频谱分析仪；
- c) 测量基波和三阶交调产物功率；
- d) 通过外推法计算三阶交调截点（IP3）。

6.4 移相性能测试

应按照以下步骤进行：

- a) 输入固定频率连续波信号；
- b) 逐步改变移相控制码（全码字扫描）；
- c) 使用VNA或相位测试仪测量输出相位；
- d) 记录相位变化量并计算步长与误差；
- e) 测量不同通道之间相位偏差；
- f) 通过示波器测量控制信号变化到输出相位稳定的时间。

6.5 幅相一致性测试

应按照以下步骤进行：

- a) 对多通道芯片输入相同幅度和相位的射频信号；
- b) 同步测量各通道输出幅度与相位；
- c) 计算平均值及最大偏差；
- d) 在不同频点和温度条件下重复测试。

6.6 开关性能测试

应按照以下步骤进行：

- a) 设置芯片在发射与接收模式之间周期性切换；
- b) 使用示波器测量控制信号与输出信号变化；
- c) 记录发射至接收及接收至发射的切换时间；
- d) 测量切换过程中信号稳定时间及抖动；
- e) 在两种模式下分别测量通道隔离度。

6.7 电源性能测试

应按照以下步骤进行：

- a) 在不同工作模式下测量电源电压、电流；
- b) 计算功耗；
- c) 在电源端叠加小幅扰动信号；
- d) 测量输出信号变化并计算电源抑制比。

6.8 环境适应性测试

6.8.1 温度适应性

应按照GB/T 2423.27的规定执行。

6.8.2 湿度适应性

应按照GB/T 2423.27的规定执行。

6.8.3 振动适应性

应按照GB/T 2423.10的规定执行。

6.8.4 抗辐射性能

应按照GB/T 46132的规定执行。

6.9 电磁兼容性测试

6.9.1 电磁抗扰度

传导抗扰度试验应按照GB/T 17626.6的规定执行,辐射抗扰度试验应按照GB/T 42968.9的规定执行。

6.9.2 静电放电抗扰度

应按照GB/T 17626.2的规定执行。

7 数据处理与结果判定

7.1 一般要求

- 7.1.1 所有测试数据应在第5章规定的测试条件下进行测量,并在第6章规定的方法下处理。
- 7.1.2 每项指标测试应至少重复3次,取算术平均值作为最终结果。
- 7.1.3 测试数据应保留有效数字,数值修约应按照GB/T 8170的规定执行。
- 7.1.4 对于多通道参数,应以最大偏差作为判定依据。

7.2 误差处理

- 7.2.1 测试系统不确定度应小于被测指标允许偏差的1/3。
- 7.2.2 对测试系统误差应进行校准或补偿。
- 7.2.3 测试连接损耗、探头损耗等应进行修正。
- 7.2.4 出现异常数据时应进行复测,并记录异常原因及处理情况。

7.3 结果判定

- 7.3.1 各项测试结果应与第4章规定的核心性能指标进行对比判定。
- 7.3.2 当所有测试指标均满足要求时,判定该T/R芯片性能为合格。
- 7.3.3 当任一项指标不满足要求时,判定该T/R芯片性能为不合格。
- 7.3.4 对于幅相一致性、开关性能等多通道指标,应以最大偏差值进行判定。

7.4 测试记录

测试记录应至少包括:

- a) 芯片型号及编号;
- b) 测试环境条件(温度、湿度、电压等);
- c) 测试设备及校准信息;
- d) 原始测试数据与处理结果;
- e) 测试日期及执行人员;
- f) 异常处理记录。

