Application Note

车载 FPD-Link 高温 S 参数测试指南

Ryan Cao, Violet Lei, Shelly Xie

摘要

S 参数（S Parameters）是衡量高速信号通道性能的重要指标，可通过 S_{11}、S_{21} 等参数量化链路的反射与传输特性。在 FPD-Link 开发流程中，S 参数用于评估 PCB 走线、连接器及线束质量，并为链路裕量分析和系统级故障诊断提供依据。在高温工况下，准确测量 S 参数有助于验证系统在较差环境条件下的稳定性。

内容

1 S 参数定义 2
2 温度的影响 3
3 测试系统 4
3.1 测试仪器 4
3.2 测前准备 4
4 测量步骤 6
5 数据处理与判定 7
5.1 S 参数超标的排查方向 7
6 参考文档 8

插图清单

图 1-1. S 参数测量拓扑 2
图 3-1. S 参数测试系统 4
图 3-2. 校准参考面与夹具去嵌 5
图 3-3. 温度循环 5
图 5-1. S 参数示意图 7
图 5-2. 反射异常的频域表现与 TDR 定位示意图 7

表格清单

表 1-1. S 参数不同测试通道的校准 2
表 2-1. 不同温度下不同影响因素对测试结果的影响 3

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 S 参数定义

S 参数基于入射波和散射波的关系表征高频网络。二端口网络的散射关系为 $b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$，$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$。$S_{11}$ 和 S_{22} 为复反射系数，S_{21} 和 S_{12} 为正向和反向传输系数。仪器显示的 Log Mag S_{11} 通常为 $20\log_{10}|S_{11}|$，数值为负；回波损耗 $RL = -20\log_{10}|S_{11}|$，数值为正。因此，$S_{11} < -10$ dB 与 RL > 10 dB 表示同一反射条件。

- S_{11}：端口 2 接匹配负载时端口 1 的复反射系数；回波损耗为 $-20\log_{10}|S_{11}|$。
- S_{21}：端口 2 接匹配负载时，从端口 1 到端口 2 的正向传输系数；无源通道的插入损耗通常表示为 $-20\log_{10}|S_{21}|$。
- S_{12}：端口 1 接匹配负载时，从端口 2 到端口 1 的反向传输系数。
- S_{22}：端口 1 接匹配负载时端口 2 的复反射系数。

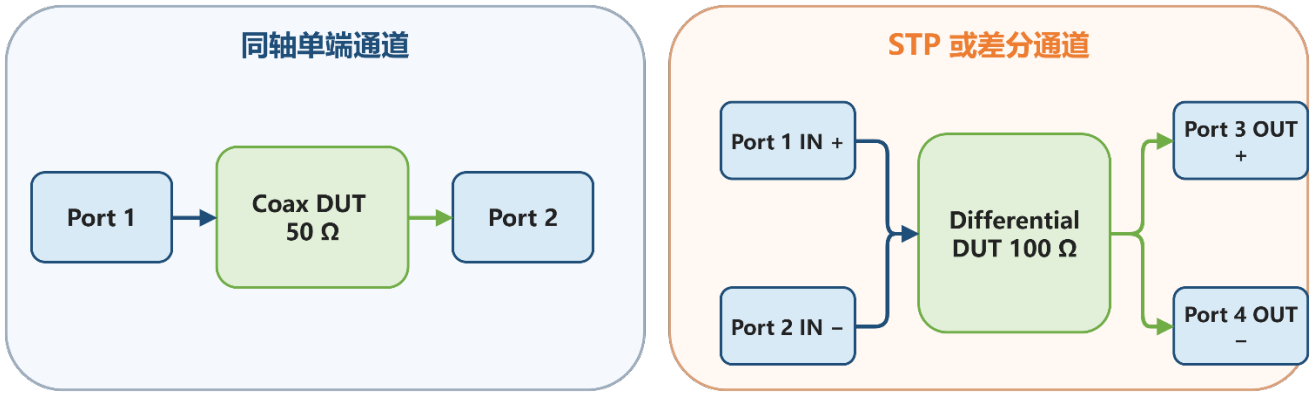


图 1-1. S 参数测量拓扑

表 1-1. S 参数不同测试通道的校准

通道	校准	测试结果
同轴单端	完整两端口校准	S_{11}、S_{22}、S_{21}、S_{12}
STP 或差分 PCB	完整多端口校准并转换为混合模式	Sdd、Scc、Sdc、Scd
含夹具的 DUT	接口校准加夹具去嵌	原始与去嵌数据均保存

备注

混合模式 S 参数中，Sdd 表示差分输入到差分输出，Scc 表示共模输入到共模输出，Sdc 表示共模输入到差分输出，Scd 表示差分输入到共模输出。下标中的第一个字母表示输出模式，第二个字母表示输入模式。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 温度的影响

温度可能改变导体电阻率、介质相对介电常数（Dk）、损耗因子（Df）、机械尺寸以及连接器接触状态。Dk 主要影响信号传播速度、电长度和特性阻抗；Df 表征介质损耗，通常会影响高频插入损耗。两者均与材料、频率和温度有关，其变化方向和幅度不能一概而论。分析时应优先采用材料供应商在目标频率和温度下的数据，并记录板材型号、叠层、铜厚与粗糙度、线缆介质和连接器材料。

表 2-1. 不同温度下不同影响因素对测试结果的影响

影响因素	可能的观测结果	验证方法
导体电阻率和表面电阻变化	高频插入损耗变化	比较 S_{21} 与 S_{12}，并通过重复测量检查一致性
Dk、Df 随温度变化	相位延迟、损耗和阻抗变化	结合材料数据、群时延和 TDR 分析
连接器或夹具热膨胀	局部反射峰和陷波	TDR 定位并进行升降温回程测试
测试电缆热漂移	整条曲线相位或幅度偏移	验证件、温度补偿或校准刷新

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 测试系统

典型测量链路包括 VNA（矢量网络分析仪）、室温连接电缆、温箱馈通、高温延长电缆或夹具以及 DUT。VNA 主机通常应保持在室温环境；进入温箱的电缆、连接器、校准件和夹具应满足目标温度要求，电缆还应符合最小弯曲半径要求。馈通处需要隔热并固定电缆，以减少温度循环引起的位移和应力。

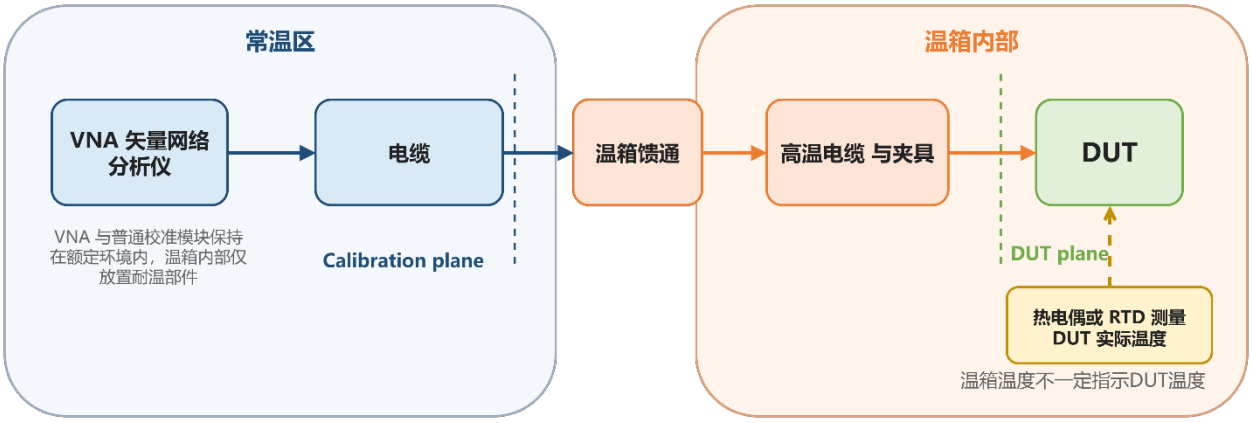


图 3-1. S 参数测试系统

3.1 测试仪器

- VNA 的端口数、频率范围、动态范围和噪声底应满足预计 DUT 损耗及目标不确定度。动态范围应按实际测量余量选择，100 dB 不是通用门槛。
- 同轴 DUT 通常使用两端口 VNA；差分 DUT 宜使用四端口 VNA，或使用经过验证且重复性满足要求的切换系统。
- 温箱内应使用耐温、低损耗且幅相稳定的测试电缆。电缆性能应以制造商数据或独立表征结果为依据，不宜引用没有来源和适用条件的统一 ppm 指标。
- 机械校准件、ECal、CalPod 和高温标准件只能在各自规定的温度、频率、连接器和功率范围内使用。除非制造商明确允许，不应把普通 ECal 模块直接放入 85°C 或更高温度的温箱。
- 使用经校准的热电偶或 RTD 测量 DUT 及关键连接器的实际温度。温箱空气温度可用于过程监控，但不能代替 DUT 温度。

3.2 测前准备

3.2.1 校准和夹具处理

- 同轴两端口 DUT：执行完整两端口校准。可采用机械 SOLT 或 ECal；当直通标准不能准确表征或布线受限时，可采用适用的 Unknown Thru 方法。
- 差分四端口 DUT：完成完整多端口校准，核对差分对的端口配对和极性后，再进行混合模式转换。
- 可制作板上校准标准的非同轴结构：可采用 TRL（Thru-Reflect-Line）校准。标准件的几何、阻抗、线长和有效频段应与 DUT 接口及测量频段相匹配。
- 参考面无法直接到达 DUT 时：先在可访问接口完成校准，再用实测夹具数据、2x-Thru/AFR 方法或经过验证的电磁模型去嵌。应说明去嵌方法、端口映射、模型方向和有效频段。

校准和去嵌：在测试过程中，应标出校准参考面和 DUT 参考面。若能在 DUT 接口使用覆盖目标温度的校准标准，可将参考面建立在 DUT 端口；若只能在温箱外或夹具入口校准，则应使用经过验证的夹具 S 参数去嵌。校准消除 VNA 与测试电缆误差；去嵌消除无法直接校准到 DUT 端口的夹具误差。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

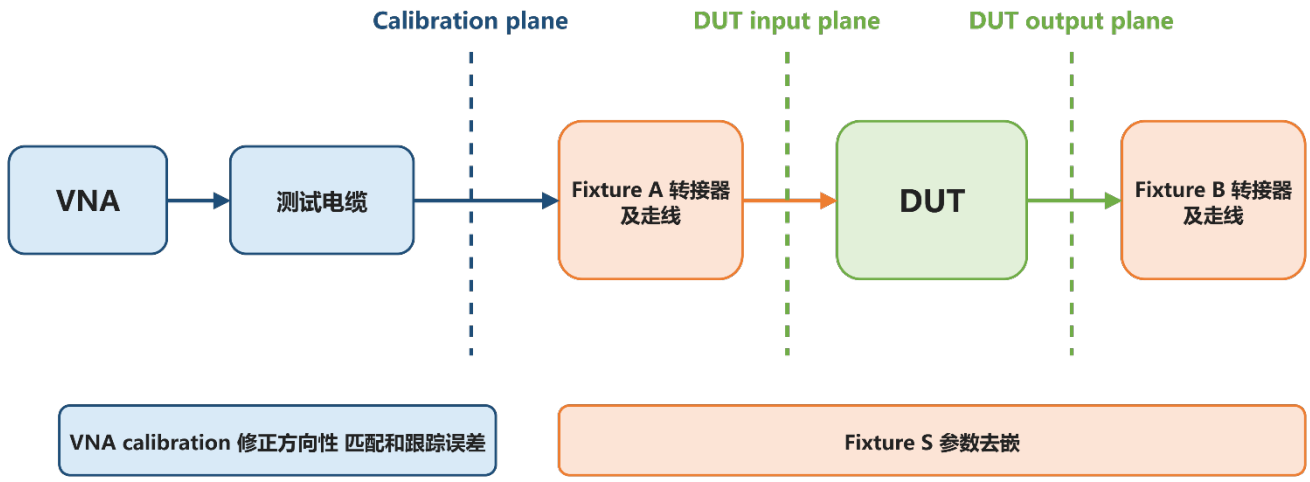


图 3-2. 校准参考面与夹具去嵌

3.2.2 温度循环和热稳定测试

温度计划通常包括室温、产品规定的最高工作温度。是否采用 −40°C、85°C、105°C 或 125°C，应由 DUT 及 OEM 的规范决定。

每次改变安装或电缆布置后，应在计划的温度极值进行预处理。到达温箱设定值后，应继续等待，直至 DUT 实测温度和 S 参数响应均稳定。

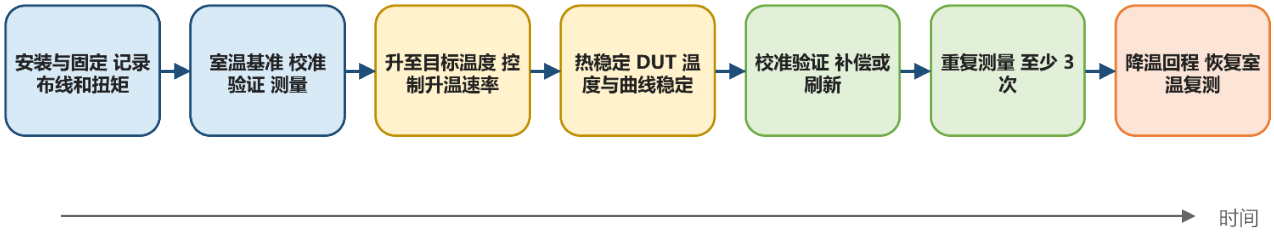


图 3-3. 温度循环

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 测量步骤

1. 确认 DUT 范围、端口定义、差分对极性和适用的信道规范。
2. 设置 VNA 的起止频率、点数、IFBW、端口功率和平均次数。除非测试计划明确规定，否则关闭平滑。若进行 TDR 或时域变换，还应统一设置窗函数、低频外推方式和等效上升时间 Tr；Tr 应与测量带宽相匹配，并在不同温度点保持一致。
3. 完成连接器清洁、扭矩连接和电缆固定，记录测试链路照片。
4. 执行完整两端口或多端口校准，并保存校准状态（calset）。
5. 按计划应用 port extension 或夹具去嵌；

   仅使用经过验证且覆盖测量频段的修正数据，同时保存原始数据和修正后数据。
6. 测量独立验证件，并确认结果满足预先规定的接受限值。
7. 安装 DUT，放置 DUT 和连接器温度传感器，并固定线缆。
8. 按温度计划完成预处理和热稳定，并按漂移控制方案执行验证、补偿或校准刷新。
9. 按重复性计划测量 DUT。设计验证阶段通常建议至少三次独立连接或重复扫描；差分 DUT 应保存完整四端口单端数据和混合模式数据。
10. 若项目需要评估温度回差，则完成升温和降温测量，并在恢复室温后复测基准点，检查结果能否恢复。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

5 数据处理与判定

测量频率范围应根据适用的 FPD-Link Channel Specification 和工作模式确定。相关信道规范可向 TI 技术支持团队申请。报告应注明器件型号、FPD-Link 代际与工作速率、传输介质（同轴或 STP）、信道范围，以及所用规范的编号、版本和日期。

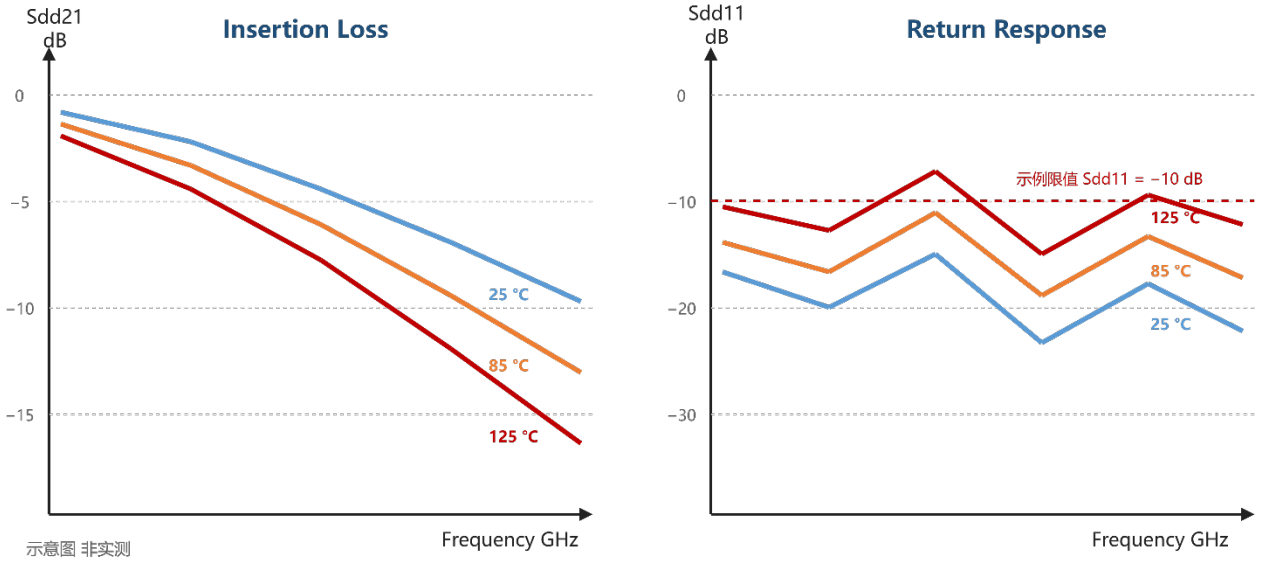


图 5-1. S 参数示意图

5.1 S 参数超标的排查方向

如图 5-2 所示，频域反射峰表示某一频段的失配增强；结合 TDR，可进一步判断阻抗不连续点位于连接器、过孔、线缆、TVS 管或电容等具体位置。

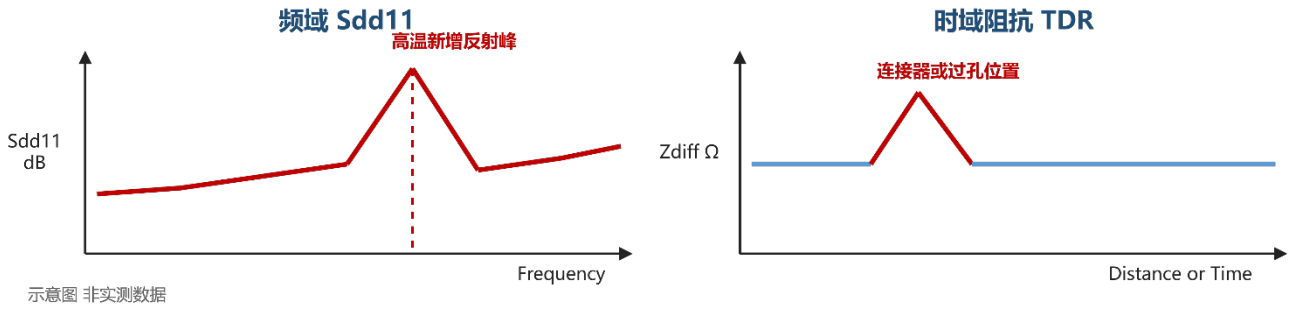


图 5-2. 反射异常的频域表现与 TDR 定位示意图

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6 参考文档

- Keysight Technologies, De-Embedding and Embedding S-Parameter Networks Using a Vector Network Analyzer, Application Note 5980-2784.
- Texas Instruments, 98x FPD-Link Channel Requirements, Version 1.2, 2025-04-17
- Texas Instruments, S 参数与 FPD-Link Channel Spec 详解

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月