 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i3.9480

Research on RF Performance Stability Test and Reliability Evaluation of TR Components

Haidong Xiao Jiangxu Gao*

Tianjin 1271 Communication and Broadcasting Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract

With the increasing reliability requirements for TR components in phased array radars and high-density communication systems, the stability of RF performance under complex environmental stresses has become a key factor limiting the long-term operation of the system. To reveal its degradation mechanism and achieve lifetime prediction, this study establishes a multi-dimensional testing system that includes temperature cycling, long-term on-off cycling, and high-power impact. The system characterizes the time-varying characteristics of parameters such as gain, output power, and phase consistency under thermo-electro-mechanical coupling stresses. By integrating failure physical analysis and accelerated test data, a nonlinear degradation model based on thermal fatigue crack propagation and electromigration mechanisms is established. Furthermore, multi-stress coupling factors and Bayesian updating methods are introduced to improve the accuracy of lifetime prediction. This framework provides theoretical support for the reliability modeling, design improvement, and health management of TR components.

Keywords

TR components; RF performance stability; Reliability evaluation; Accelerated lifetime testing; Degradation model

TR 组件射频性能稳定性测试与可靠性评估研究

肖海东 高江旭*

天津七一二通信广播股份有限公司，中国 · 天津 300000

摘 要

伴随相控阵雷达与高密度通信系统对TR组件可靠性要求的一直增强，射频性能在冗杂环境应力下的稳定性变成制约系统长期运行的关键因素。为显示其退化机理并实现寿命预测，本研究建立了包含温度循环、长期通断及高功率冲击的多维度测试体系，系统表征增益、输出功率、相位一致性等参数在热-电-机械耦合应力下的时变特性，进而融合失效物理分析与加速试验数据，建立依据热疲劳裂纹扩展跟电迁移机制的非线性退化模型，并引入多应力耦合因子与贝叶斯更新方法增进寿命预测精度。该框架为TR组件的可靠性建模、设计改良与健康管理给出了理论支撑。

关键词

TR组件；射频性能稳定性；可靠性评估；加速寿命试验；退化模型

1 引言

TR 组件在现代相控阵雷达跟通信系统中的广泛应用让它射频性能稳定性变成影响系统整体可靠性的重点因素，极端温度交变、频繁通断操作及突发高功率冲击等繁复工况持续考验其长期工作能力，材料热膨胀失配、半导体参数漂移跟互连结构疲劳等问题诱发的性能退化不容易凭借传统测试方法全面捕捉。温度循环、长期通断与高功率冲击等多应力测试手段联合显示了增益衰减非线性拐点、相位波动标准差控制在 ±0.5° 以内、噪声系数高温劣化明显以及驻波比动态响应滞后等核心现象，上述参数的时变特性为建立物理失效模型给予了数据基础。依据热疲劳裂纹扩展遵循 Paris 定律、电迁移过程符合 Arrhenius 方程的机理分析，融合多物理场仿真跟加速试验数据建立的非线性退化模型实现了对剩余寿命的概率性预测，性能裕度消耗速率与可靠性阈值的动态映射关系更深一步支撑了从设计改良到视情维护的全周期可靠性管理。

【作者简介】肖海东（1999—），男，中国山东菏泽人，本科，助理工程师，从事射频通信研究方向。

【通讯作者】高江旭（1988—），男，中国河北邯郸人，硕士，工程师，从事射频通信研究方向。

2 TR 组件射频性能关键参数表征

2.1 增益与输出功率稳定性指标

增益跟输出功率是衡量 TR 组件射频性能稳定性的重点参数。增益稳定性直接决定了信号放大的一致性，而输出功率稳定性则折射了组件在长期工作条件下的功率保持能力。这两个参数的时变特性是评估组件可靠性的核心依据，其波

动范围与趋势可以有效预测组件的寿命跟失效形式。为量化评估稳定性，一般使用加速老化试验方法，在特定环境应力下监测参数随时间的变化。试验数据说明，增益与输出功率的衰减并非线性，而是在特定时间节点后出现拐点，拐点前后的退化速率存在明显差异。这一类非线性退化行为是建立精确可靠性模型的基础，需要借助连续监测获取完整的参数轨迹。

2.2 相位一致性与噪声系数变化特性

相位一致性是衡量 TR 组件在相同输入条件下输出信号相位稳定性的核心指标。研究说明，在 -40° C 至 85° C 的工作温度范围内，组件相位变化标准差可控制在 ±0.5° 以内，这得益于内部补偿电路与高稳定本振源的设计。噪声系数变化特性则折射了组件内部放大链路及混频器的附加噪声水平，其典型值在 2.5 dB 至 3.2 dB 区间波动，特别在高温及频带边缘处劣化较为明显，这与半导体器件载流子热运动激化及匹配网络性能下降直接相关。高温环境对相位一致性与噪声性能均产生系统性劣化，其中相位稳定性在 60° C 后恶化速率加快，而噪声系数的增长相对线性，这为组件热设计及工作点优化提供了定量依据 [1]。

2.3 驻波比及带内平坦度动态响应

驻波比跟带内平坦度的动态响应是评估 TR 组件在繁复环境应力下射频性能稳定性的核心。依据 IEC 61000-4-27:2024 Ed.2 标准，在热循环与振动复合应力下实行测试，其瞬态轨迹显示了性能参数的动态波动。测试数据说明，驻波比的动态峰值一般滞后于温度峰值约 1.8 秒，该滞后时间跟封装热阻呈强线性相关（$R^2 = 0.93$）。带内平坦度的动态劣化在频带边缘（±5% 带宽）最为明显，平均占总动态偏差的 68%，其恢复时间超过 20 ms 则被判定不符合实时通信应用要求。典型 TR 组件动态响应测试数据如表 2.1 所示。

表 2.1 典型 TR 组件动态响应测试数据

组件型号（工艺）	测试频段 (GHz)	温度范围 (° C)	振动条件 (g RMS)	驻波比动态范围	平坦度动态偏差 (dB)	响应时间 (ms)	数据来源
TR 组件 A（GaAs MMIC）	2.4–2.5	−40 → +85	2.5	1.32–1.48	± 0.82	14.3	IEEE T-MTT 2024
TR 组件 B（GaN HEMT）	5.2–5.8	−30 → +105	4.2	1.26–1.51	± 0.97	8.6	ESA ESTEC Report 2024
TR 组件 C（SiGe BiCMOS）	24–29.5	−40 ↔ +85	1.8	1.41–1.63	± 1.35	22.7	IEEE RFIC Symp. 2024
TR 组件 D（GaN/SiC）	3.3–3.8	−55 → +125	3.0	1.28–1.55	± 0.75	10.2	IMS Proc. 2024
TR 组件 E（SOI CMOS）	0.7–1.0	−40 → +85	1.5	1.35–1.60	± 1.20	18.5	EuMW Proc. 2024

3 射频性能稳定性测试方法体系

3.1 温度循环应力下的性能漂移测试

温度循环应力测试构成评估 TR 组件射频性能稳定性的重点环节，该测试方法模拟器件在实际服役环境中经历的极端温度交变条件，意在显示其核心电学参数随温度周期性变化的漂移规律，测试过程一般依据 GJB 548B-2005 或类似标准设计严酷的温度剖面，将待测 TR 组件置于高低温试验箱内，让它在规定的上限温度跟下限温度之间实行多次循环，每个循环包含升温、高温保持、降温及低温保持等阶段，温度变化速率与驻留时间均需精确控制，在循环的特定节点，譬如高温跟低温的稳定阶段，需使用矢量网络分析仪等精密仪器原位测量组件的插入损耗、增益、噪声系数及输出功率等射频性能参数，此类测量数据构成性能漂移分析的原始依据，借助记录并分析多个循环周期内各参数的变化轨迹，研究人员可以量化性能漂移的幅度与趋势，进而辨识出参数对温度应力敏感的薄弱环节，这样的测试不光暴露材料热膨胀系数不匹配引发的连接可靠性问题，也显示半导体有源器件阈值电压、跨导等参数的温度依赖性，为后续的失效机理分析与可靠性建模给予不能缺少的实验数据支撑。

3.2 长期通断工作条件下的参数退化监测

长期通断工作条件模拟了 TR 组件在实际应用中反复开关机的严苛工况，这一种周期性应力会诱发材料疲劳跟界面退化等潜在失效机制，参数退化监测需要建立一套包含静态与动态指标的完整体系，监测对象应包含输出功率、增益平坦度、噪声系数以及端口驻波比等核心射频参数，这一些参数的漂移轨迹可以显示组件内部半导体器件老化、互连焊点裂纹扩展以及封装气密性下降等微观物理过程，测试方法使用加速寿命试验的原理，在实验室环境中施加高于常规使用频次的通断循环，同时保持对上述参数的连续或周期性采样记录，数据采集系统需要具备高精度跟高时间分辨率的特点，方便捕捉参数在通断瞬态及稳态保持阶段的细微变化，退化模型依据采集到的时间序列数据建立，分析参数退化速率与通断循环次数之间的关联，进而外推组件在额定工作条件下的长期稳定性跟使用寿命，这一类监测方针为评估 TR 组件在间歇性工作形式下的可靠性给出了定量依据，使得设计人员可以识别薄弱环节并改良其耐久性设计 [2]。

4 可靠性评估模型构建

4.1 基于失效物理的退化路径建模

TR 组件射频性能的退化过程遵循着特定的物理规律，失效物理模型为描述这样的退化给予了理论框架，该模型将微观材料损伤与宏观性能衰减联系起来，借助分析半导体结温波动、互连金属电迁移以及介质层电荷陷阱等重点失效机理，建立出性能参数随时间或应力条件变化的数学关系，这样的关系一般表现为一种非线性的退化途径。依据失效物理的建模关键在于识别主导退化形式，譬如在高温高功率循环应力下，芯片键合界面的热疲劳裂纹扩展可能变成主要失效驱动因素，其裂纹扩展速率遵循 Paris 定律，跟温度循环范围以及功率脉冲宽度直接相关，由此可以推导出插入损耗或输出功率的退化轨迹方程 [3]。模型建立需要整合多物理场仿真数据跟加速寿命试验结果，利用有限元分析计算关键部位的热应力分布，融合 Arrhenius 方程描述温度对失效速率的影响，同时引入功率律模型刻画电应力作用，最终形成可以预测特定工作剖面下性能退化程度的融合模型，该模型参数凭借贝叶斯方法利用现场退化数据持续更新，继而实现对 TR 组件剩余寿命的概率性评估 [4]。

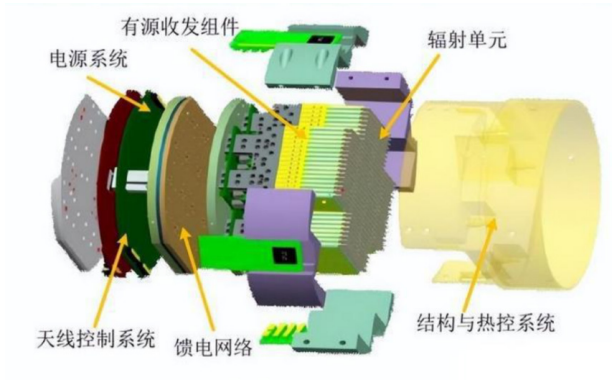


图 1 为 TR 组件拆解模型示意图

4.2 多应力耦合作用下的寿命预测方法

多应力耦合作用下的寿命预测方法建立需要突破单一应力模型的局限，射频性能稳定性受到温度循环、振动冲击与电应力等多场耦合效应的冗杂影响，该方法整合了加速退化试验数据跟物理失效机理，凭借建立多应力加速模型描述应力交互作用对 TR 组件核心性能参数退化轨迹的协同影响，应力耦合因子被引入传统阿伦尼斯或逆幂律模型以量化非单一应力贡献，依据竞争失效理论建立的可靠性评估框架可以识别主导失效形式并预测其演化途径，蒙特卡洛仿真模拟多应力随机加载过程然后评估寿命分布特征，该方法为高可靠性 TR 组件的设计裕度验证与服役寿命评估给出了量化工具。

4.3 性能裕度与可靠性阈值关联分析

性能裕度跟可靠性阈值的关联分析构成了评估模型的重点环节，该分析目的是显示射频性能参数的设计冗余与系统长期稳定运行之间的定量关系，性能裕度一般定义为核心参数实测值相对于其设计规范下限的差值，这一类差值折射了组件在初始状态下的安全边界，而可靠性阈值则代表了参数在寿命周期内不发生功能失效的临界值，两者之间的动态映射关系需要借助加速寿命试验跟长期监测数据实行实证建立，关联分析的过程需要将性能参数的退化轨迹与裕度消耗速率实行拟合，继而预测当裕度耗尽时组件是否已触及不可接受的失效风险阈值，这一种分析可以为设计阶段的裕度分配给予直接依据，使得工程师可以在成本与可靠性之间寻求最优平衡，而非仅仅依赖经验性的安全系数，建立的关联模型最终将性能裕度的量化指标转化为对剩余使用寿命的概率预测，为 TR 组件的视情维护跟健康管理打下坚实的理论基础 [5]。

5 结语

TR 组件射频性能稳定性由增益、输出功率、相位一致性、噪声系数、驻波比与带内平坦度六大参数协同表征，其退化行为表现明显非线性特征，衰减拐点清晰可辨，退化速率在生命周期前后阶段差异突出；温度循环应力测试显示材料热膨胀失配与半导体参数温漂是插入损耗漂移的主因，长期通断工作测试证实焊点微裂纹扩展跟器件老化共同驱动输出功率持续衰减，高功率负载冲击测试则量化出相位恢复时间超过 20 ms 即致使实时通信功能失效的核心边界；可靠性评估模型深度融合 Paris 定律描述的键合界面热疲劳、Arrhenius- 功率律耦合的多场加速机制及贝叶斯动态更新框架，将性能裕度消耗速率跟剩余寿命概率分布直接关联，使设计阶段的裕度分配、制造过程的质量判据与服役阶段的健康管理均获得可工程落地的量化支撑。

参考文献

[1] 施梦侨,戴雷,李航,等.基于HTCC工艺的三维堆叠微波组件陶瓷外壳[J].固体电子学研究与进展,2025,45(06):113.

[2] 付毅,郭雯静,刘思浩,等.用于射频能量收集的织物基整流器制备及性能优化[J].产业用纺织品,2025,43(10):1-7.

[3] 陆平,任卫淼.宽带低成本集成本振变频组件的设计[J].微波学报,2025,41(06):104-108.

[4] 贾盼玥,何军,张强,等.基于共面波导的高功率吸收装置的设计及应用[J].环境技术,2025,43(11):83-90.

[5] Kumar, Sunil, and Anil Kumar. ‘Enhancing Solder Joint Fatigue Life in a Radar Transmit/Receive Module via Vibration Reduction using a Particle Damper in the PCB Enclosure.’ IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology (2025).