

团 体 标 准

T/CASAS 031—2023

面向 5G 基站应用的 Sub-6GHz 氮化镓功放 模块测试方法

Test method of Sub-6GHz GaN power amplifier for 5G base station
application

版本: V01.00

2023-06-30 发布

2023-07-01 实施

第三代半导体产业技术创新战略联盟 发布

目 次

前 言.....	III
引 言.....	IV
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 符号和缩略语.....	1
5 测试条件.....	2
6 输入条件.....	2
7 测试工具/仪表要求.....	3
8 测试方法.....	3
8.1 通则.....	3
8.2 GaN 功放性能指标测试方法.....	3
8.2.1 增益及增益平坦度测试.....	3
8.2.2 线性动态范围内增益波动测试.....	4
8.2.3 额定输出功率及效率测试.....	5
8.2.4 DPD 测试（ACLR）.....	6
8.2.5 DPD 测试（频谱辐射模板）.....	7
8.2.6 DPD 测试（EVM）.....	8
8.2.7 带外杂散测试.....	9
8.2.8 谐波测试.....	10
9 数据记录和处理.....	11
10 测试报告.....	11
附录 A（资料性）测试数据记录.....	13
参考文献.....	15

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。

本文件由第三代半导体产业技术创新战略联盟标准化委员会（CASAS）制定发布，版权归 CASAS 所有，未经 CASAS 许可不得随意复制；其他机构采用本文件的技术内容制定标准需经 CASAS 允许；任何单位或个人引用本文件的内容需指明本文件的标准号。

本文件主要起草单位：中兴通讯股份有限公司、中国电子科技集团公司第十三研究所、中国电子科技集团公司第五十五研究所、苏州能讯高能半导体有限公司、厦门市三安集成电路有限公司、中国科学院半导体研究所、西安电子科技大学、清华大学、北京大学、工业和信息化部电子第五研究所、北京第三代半导体产业技术创新战略联盟。

本文件主要起草人：封葳、王宇、段向阳、别业楠、刘建利、樊宁、王晖、董晶、默江辉、周强、裴轶、刘波亭、魏学成、郑雪峰、陈文华、王茂俊、蔡宗棋、徐瑞鹏。

引 言

氮化镓作为新型战略半导体材料，以其优异的性能已成为 5G 基站的最佳选择。随着 5G 基站相关技术的不断突破与更新，氮化镓功放模块受到越来越多的重视。围绕氮化镓功率器件的功放模块电路设计技术不断取得突破，已成为 5G 基站的关键部件，并逐步开始在多个领域进行商用。

为了进一步加快氮化镓功放的产业化发展和规模化应用，迫切需要制定氮化镓功放模块的相关测试方法和规范，以便更加有效和专业的评估氮化镓功放性能，提升 5G 基站性能指标和产品竞争力，缩短研发和生产周期、提高生产效率。同时拉通和氮化镓器件指标和测试方法的关联关系，促使氮化镓厂家不断提升产品性能和质量，为我国通信技术持续领先和第三代半导体的产业化奠定基础。

本文件根据我国三大运营市场需求和入网测试指南，借鉴 3GPP TS 37.104 V16.5.0 等国际通信协议，并结合了近几年科研人员在氮化镓功放领域的研发、测试评估以及应用方面的经验总结，对氮化镓功放性能指标的测试方法进行了详细的规定，包括且不限于测试目的、测试环境、测试方法及步骤、测试工具及仪表等，但局限于当前科研人员对氮化镓功放本身的认知，以及该产品生产与应用所处的发展阶段，可能还存在一些不足的地方，后续将根据研究进展不断进行完善和升级。

面向 5 G 基站应用的 Sub-6 GHz 氮化镓功放模块测试方法

1 范围

本文件描述了氮化镓功放模块（以下简称“GaN 功放”）的测试条件、测试要求和测试方法。
本文件适用于 GaN 功放的测试、质量评价。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

氮化镓功放模块 GaN power amplifier module

采用氮化镓功率器件研发的 5G 基站射频功率放大模块，一般为多尔蒂（Doherty）架构，通常置于发射机的末端。

注：其主要功能是将已调制的射频信号放大至所需的功率，然后通过天线辐射到空间，由移动终端进行接收。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

f_{offset} : 测量滤波器中心点频率偏移。

$f_{offset_{max}}$: 测量滤波器中心点频率偏移最大值。

H : GaN 功放效率。

I : GaN 功放漏极电流。

P_{out} : 输出功率。

PA_{in} : 功放输入。

PA_{out} : 功放输出。

U : GaN 功放漏极电压。

Δf : 测量滤波器 - 3dB 点频率偏移。

Δf_{max} : 测量滤波器 - 3dB 点频率偏移最大值。

$\langle A \rangle$: 参数符号，以实际为准。

$\langle B \rangle$: 参数符号，以实际为准。

$\langle C \rangle$: 参数符号，以实际为准。

ACLR: 相邻频道泄露比 (Adjacent Channel Leakage Ratio)。

BBU: 基带单元 (Base-Band Unit)。

BS: 基站 (Base Station)。

DPD: 数字预失真 (Digital PreDistortion)。

- EVM 误差向量幅度 (Error Vector Magnitude) 。
- FWD: 前向反馈 (Forward) 。
- VBW: 视频带宽 (Video BandWidth) 。
- PA: 功放 (Power Amplifier) 。
- PRX: 耦合端口 (Power Reverse) 。
- PWR: 供电单元 (Power) 。
- RBW: 分辨率带宽 (Resolution BandWidth) 。
- REV: 反向反馈 (Reverse) 。
- RF: 射频 (Radio Frequency) 。
- RMS: 均方根 (Root Mean Square) 。
- SW: 前/反向信号切换电路 (Switch) 。

5 测试条件

本文中的 GaN 功放测试仅为常温下的性能指标测试，测试条件如下：

- a) 测试环境温度要求为 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 测试环境相对湿度不超过 65 %。

6 输入条件

本文件中结合图1GaN功放框图，对被测GaN功放的测试输入条件要求如下：

- a) GaN 功放至少包含一组完整且正常可使用的 PA_{in} 和 PA_{out} 端口；
- b) GaN 功放的 PWR 可保证功放正常供电，正常供电后 GaN 功放静态电流显示正常；
- c) GaN 功放的控制单元 (Control) 可正常控制功放开关 (包含打开和关闭)、SW 中 PRX 上 FWD 和 REV 的切换等功能；
- d) GaN 功放外观良好，无破损或其他异常情况。

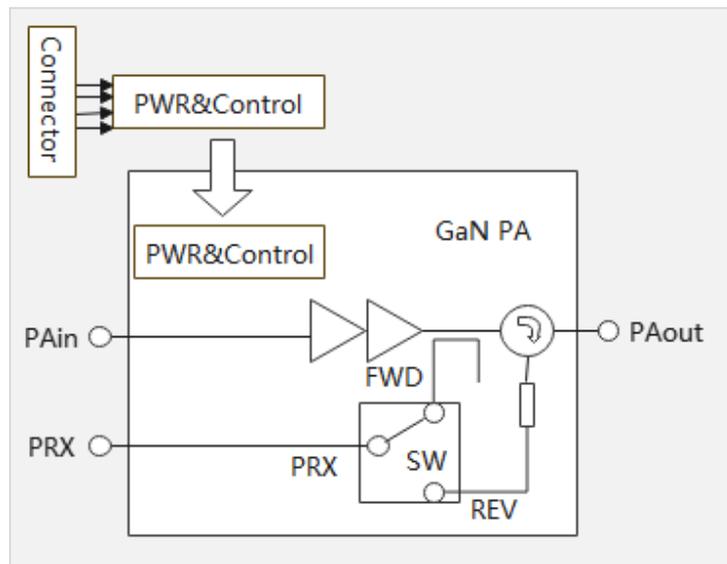


图1 GaN 功放框图

7 测试工具/仪表要求

本文件中测试工具/仪表要求如表 1 所示。

表1 测试工具/仪表要求

测试工具/仪表	性能要求
大功率衰减器	频率范围至少满足 sub-6 GHz，功率要求至少 200 W，衰减值宜为 40 dB
矢量网络分析仪	频率范围至少满足 sub-6 GHz，输出功率不小于 0 dBm 且动态范围大于等于 50 dB
直流稳压电源	电源供电电压推荐不小于 60 V，供电电流应不小于 20 A
频谱仪	频率范围至少满足 sub-6 GHz，至少包含 5G NR 信号所需的各类模板
功率计	频率范围至少满足 sub-6 GHz，功率检测至少大于 30 dBm
信号源	频率范围至少满足 sub-6 GHz，至少可输出单音信号
耦合器	频率范围至少满足 sub-6 GHz，功率要求至少 200 W，耦合度宜为 40 dB
DPD 工装	一种实现 DPD 闭环的收发信板，可输出 GaN 功放测试所需载波，并由 PRX 设置为 FWD 完成前向采样和 DPD 闭环功能，型号和版本以实物为准
电调工装	一种用于功放打开或关闭的数字电路模块，型号与版本以实物版本为准

8 测试方法

8.1 通则

本文件中所有测试方法遵从以下通则：

- 仪表设置中涉及到的具体参数，以实际测试时 GaN 功放具体情况为参考依据；
- 对于 GaN 功放线性指标的测试，默认均指 DPD 闭环开启后等待一段时间，待 DPD 闭环功能完成后的指标；
- 本文件中在各章节出现的<A>、、<C>等参数代号，无相关性；
- 本文件中 GaN 功放主要针对于 5G NR 制式信号做出规范，因此除非另做说明，GaN 功放各性能指标特指其在 5G NR 信号下对应的指标要求。

8.2 GaN 功放性能指标测试方法

8.2.1 增益及增益平坦度测试

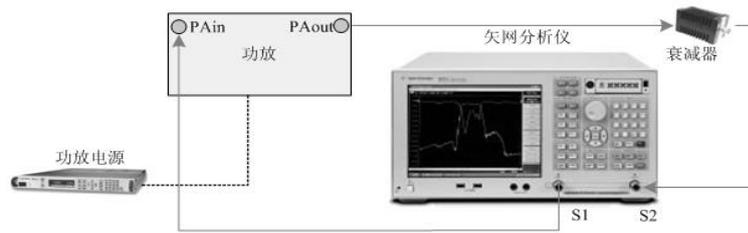
8.2.1.1 测试目的

GaN 功放增益及增益平坦度测试目的：

- 检测 GaN 功放发射通道增益指标是否满足通过准则及指标要求；
- 检测 GaN 功放发射通道增益平坦度（带内波动）指标是否满足通过准则及指标要求。

8.2.1.2 测试框图

GaN 功放发射通道增益及平坦度测试如图 2 所示。



注：GaN功放的测试连接图，主要考虑射频仪表的连接，仅为示意图

图2 发射通道增益及平坦度测试框图

8.2.1.3 测试方法和步骤

按照以下步骤测试 GaN 功放增益及增益平坦度：

- a) 按图 2 连接测试系统，打开仪表加电（先不接被测功放），预热 30 min，以保证测试精度；
- b) 接通功放外接电源，预热 10 min~15 min；
- c) 矢量直通校准：设置矢量网络分析仪中心频率为(A) MHz，频率范围（SPAN）为(B) MHz，输出功率为(C) dBm，其中矢量频率范围设置一般建议略大于功放实际工作频段（推荐值为左右各外扩 50 MHz），矢量输出功率设置一般建议为 0 dBm；
- d) 打开 RF 开关，选择双端口直通校准；
- e) 校准完成后，增益曲线的最大值和最小值之差应小于 0.1 dB；
- f) 关闭 RF 开关，将矢网的输出功率更改为 GaN 功放额定输出时的输入功率；
- g) 保存校准环境为指定的文件名称；
- h) 按图 1 连接测试系统，首先打开 GaN 功放栅极电源，其次打开 GaN 功放漏极电源；
- i) 在 GaN 功放漏极电源上观察功放静态电流，保证功放静态电流正常；
- j) 调出步骤 g 中保存的增益测试校准环境文件；
- k) 将矢量网络分析仪 RF 打开，测试功放的增益、平坦度是否满足要求，并对该增益曲线进行保存；
- l) 对于多通道功放，重复步骤 a 到步骤 k，进行其他通道的测试；
- m) 测试结束，首先关闭 GaN 功放漏极电源，其次关闭 GaN 功放栅极电源。

8.2.1.4 通过准则及指标要求

原则上 GaN 功放增益及增益平坦度无具体要求，但至少应满足 GaN 功放设计要求。

8.2.2 线性动态范围内增益波动测试

8.2.2.1 测试目的

检测功放在规定的线性动态范围内，其增益波动指标是否满足通过准则及指标要求。

8.2.2.2 测试框图

如图 2 所示。

8.2.2.3 测试方法和步骤

按照以下步骤测试 GaN 功放线性动态范围内增益波动：

- a) 按图 2 连接测试系统，打开仪表加电（先不接被测功放），预热 30 min，以保证测试精度；
- b) 接通功放外接电源，预热 10 min~15 min；
- c) 线性动态范围内增益波动校准：设置矢量网络分析仪的扫描方式为功率扫描，扫描频点为 $\langle A \rangle$ MHz，起始功率为 $\langle B \rangle$ dBm，终止功率为 $\langle C \rangle$ dBm，其中扫描频点一般设置为功放工作频段内的起始频点、中间频点和终止频点，起始功率一般设置为功放动态范围的上限，终止功率一般设置为功放动态范围的下限；
- d) 将 RF 打开，选择双端口直通校准；
- e) 校准完成后，增益曲线的最大值和最小值之差应小于 0.1 dB；
- f) 关闭 RF，将校准环境保存为指定的文件名称；
- g) 按图 1 连接测试系统，首先打开 GaN 功放栅极电源，其次打开 GaN 功放漏极电源；
- h) 在 GaN 功放漏极电源上观察功放静态电流，保证功放静态电流正常；
- i) 调出步骤 f 中保存的线性动态范围内增益波动校准环境文件；
- j) 将矢量网络分析仪 RF 打开，在起始和终止功率范围内，分别测试最大增益和最小增益值，将最大增益值和最小增益值相减，即可得出线性动态范围内的增益波动；
- k) 对于多通道功放，重复步骤 a 到步骤 j，进行其他通道的测试；
- l) 测试结束，首先关闭 GaN 功放漏极电源，其次关闭 GaN 功放栅极电源。

8.2.2.4 通过准则及指标要求

GaN 功放线性动态范围内增益波动测试要求应 ≤ 3 dB。

8.2.3 额定输出功率及效率测试

8.2.3.1 测试目的

GaN 功放额定输出功率及效率测试目的：

- a) 检测功放发射通道额定输出功率指标是否满足通过准则及指标要求；
- b) 检测功放效率指标是否满足通过准则及指标要求。

8.2.3.2 测试框图

GaN 功放额定输出功率及效率测试如图 3 所示。

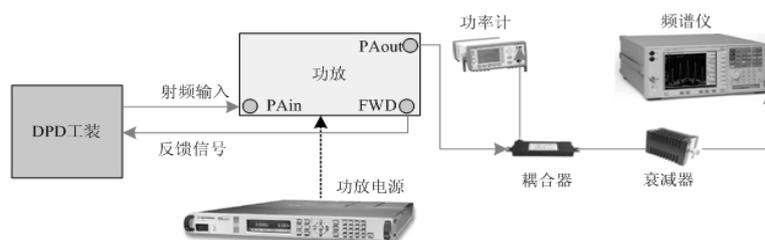


图3 额定输出功率及效率测试框图

8.2.3.3 测试方法和步骤

按以下步骤测试 GaN 功放额定输出功率及效率：

- a) 按图 3 连接测试系统，打开仪表加电（先不接被测功放），预热 30 min，以保证测试精度；
- b) 接通功放外接电源，预热 10 min~15 min；
- c) 对相应的测试线缆及耦合损耗进行校准，将射频输出损耗值设置到频谱仪或功率计的偏置中，使得相关仪表的读数等于 GaN 功放的实际输出功率；
- d) 首先打开 GaN 功放栅极电源，其次打开 GaN 功放漏极电源；
- e) 在 GaN 功放漏极电源上观察功放静态电流，保证功放静态电流正常；
- f) 操作 DPD 工装在功放工作中心频点处输出实际所需测试的载波信号；
- g) 逐步增加 DPD 工装的输出功率，直到 GaN 功放输出达到功放额定输出功率；
- h) 使用功率计读取当前功率，即为 GaN 功放额定输出功率 P_{out} ；
- i) 开启 DPD 闭环训练，等待一段时间，保证 DPD 闭环功能完成；
- j) 用 GaN 功放漏极电源读出功放实际漏极电压和电流值 I ，其中功放漏压要考虑电压压降的影响，即功放漏极电压 $U = \text{功放实际漏极电压} - \text{电压压降}$ ；
- k) 计算效率： $\eta = P_{out} / (U \times I)$ ，应该保持此时的 GaN 功放输出功率 P_{out} 为额定输出功率；
- l) GaN 功放在效率计算时，需要考虑功放漏极电源的读数为 GaN 功放的平均电流；
- m) 重复步骤 a 到步骤 l，进行其他频点或其他通道（多通道功放）的测试；
- n) 测试结束，首先关闭 GaN 功放漏极电源，其次关闭 GaN 功放栅极电源。

8.2.3.4 通过准则及指标要求

原则上 GaN 功放（5G NR）输出功率和效率无具体要求，但至少应满足 GaN 功放设计要求。

8.2.4 DPD 测试（ACLR）

8.2.4.1 测试目的

检测 GaN 功放线性指标相邻频道泄露比（ACLR）是否满足通过准则及指标要求。

8.2.4.2 测试框图

如图 3 所示。

8.2.4.3 测试方法和步骤

按以下步骤测试 GaN 功放线性指标（ACLR）：

- a) 按图 2 连接测试系统，打开仪表加电（先不接被测功放），预热 30 min，以保证测试精度；
- b) 接通功放外接电源，预热 10 min~15 min；
- c) 对相应的测试线缆及耦合损耗进行校准，将射频输出损耗值设置到频谱仪或功率计的偏置中，使得相关仪表的读数等于 GaN 功放的实际输出功率；
- d) 首先打开 GaN 功放栅极电源，其次打开 GaN 功放漏极电源；
- e) 在 GaN 功放漏极电源上观察功放静态电流，保证功放静态电流正常；

- f) 操作 DPD 工装在工作中心频点处输出实际需测试的载波信号；
- g) 逐步增加 DPD 工装输出，直到 GaN 功放输出达到功放额定输出功率 P_{out} ；
- h) 开启 DPD 闭环训练，等待一段时间，保证 DPD 闭环功能完成；
- i) 操作频谱仪，选择载波信号所对应的 ACLR 模板，例如对于 5G NR 20 MHz 载波，一般设置频谱仪中心频率与载波中心频率保持一致，设置频谱仪工作带宽为 20 MHz，设置左、右临道带宽为 20 MHz，VBW 为 100 kHz，OBW 为 300 kHz（一般推荐 $VBW=3*RBW$ ），平均次数一般设置为 10 次；
- j) 等待 DPD 闭环完成后，读取左、右临道功率与工作带宽内功率差值即为该载波中心频点下的 ACLR 值；
- k) 如果 ACLR 值跳动较大，可适当增加 DPD 闭环等待时间或增加频谱仪的平均次数，以便观测更加真实和准确的 ACLR 值；
- l) 如果所需测试的信号是其他 5G NR 载波，需针对各载波信号重新配置频谱仪，然后分别进行线性指标 ACLR 的测试；
- m) 重复步骤 a 到步骤 l，进行其他频点或其他通道（针对多通道的功放）的测试；
- n) 测试结束后，首先关闭 GaN 功放漏极电源，其次关闭 GaN 功放栅极电源。

8.2.4.4 通过准则及指标要求

GaN 功放 DPD 测试（ACLR）测试要求应满足在设计要求的额定输出功率下 DPD 闭环开启后其 ACLR（临道）要求至少小于等于 -45 dBc（每载波带宽）。

8.2.5 DPD 测试（频谱辐射模板）

8.2.5.1 测试目的

检测 GaN 功放线性指标（频谱辐射模板）是否满足通过准则及指标要求。

8.2.5.2 测试框图

如图 3 所示。

8.2.5.3 测试方法和步骤

按以下步骤测试 GaN 功放线性指标（频谱辐射模板）：

- a) 按图 3 连接测试系统，打开仪表加电（先不接被测功放），预热 30 min，以保证测试精度；
- b) 接通功放外接电源，预热 10 min~15 min；
- c) 对相应的测试线缆及耦合损耗进行校准，将射频输出损耗值设置到频谱仪或功率计的偏置中，使得相关仪表的读数等于 GaN 功放的实际输出功率；
- d) 首先打开 GaN 功放栅极电源，其次打开 GaN 功放漏极电源；
- e) 在 GaN 功放漏极电源上观察功放静态电流，保证功放静态电流正常；
- f) 操作 DPD 工装在工作中心频点处输出实际需测试的载波信号；
- g) 逐步增加 DPD 工装输出，直到 GaN 功放输出达到功放额定输出功率 P_{out} ；

- h) 开启 DPD 闭环训练，等待一段时间，保证 DPD 闭环功能完成；
- i) 操作频谱仪，选择载波信号所对应的频谱辐射模板，一般设置频谱仪中心频率与载波中心频率保持一致，其中频谱辐射模板中 f_offset 设置详见表 4 中测量滤波器中心点频率偏移 f_offset 设置，注意不同 f_offset 偏移范围对应的测试带宽 RBW 均不一样，一般推荐 $VBW=3*RBW$ ，平均次数一般设置为 10 次；
- j) 等待 DPD 闭环完成后，读取不同 f_offset 下功率值即为该载波中心频率下的频谱辐射模板值；
- k) 如果频谱辐射模板值跳动较大，可适当增加 DPD 闭环等待时间或增加频谱仪的平均次数，以便观测更加真实和准确的频谱辐射模板值；
- l) 如果所需测试的信号是其他 5G NR 载波，需针对各载波信号重新配置频谱仪，然后分别进行频谱辐射模板的测试；
- m) 重复步骤 a 到步骤 l，进行其他频点或其他通道（针对多通道的功放）的测试；
- n) 测试结束后，首先关闭 GaN 功放漏极电源，其次关闭 GaN 功放栅极电源。

8.2.5.4 通过准则及指标要求

GaN 功放 DPD 测试（频谱辐射模板）测试要求在设计要求的额定输出功率下 DPD 闭环开启后其频谱辐射模板应至少满足表 2 要求。

表2 GaN 功放频谱辐射模板要求

测量滤波器 - 3 dB点频率偏移 Δf	测量滤波器中心点频率偏移 f_offset	最大功率电平	测量带宽RBW
$0 \text{ MHz} \leq \Delta f < 5 \text{ MHz}$	$0.05 \text{ MHz} \leq f_offset < 5.05 \text{ MHz}$	$-7 \text{ dBm} - \frac{7}{5} \cdot \left(\frac{f_offset}{\text{MHz}} - 0.05 \right) \text{ dB}$	100 kHz
$5 \text{ MHz} \leq \Delta f < 10 \text{ MHz}$	$5.05 \text{ MHz} \leq f_offset < 10.05 \text{ MHz}$	-14 dBm	100 kHz
$10 \text{ MHz} \leq \Delta f \leq \Delta f_{\text{max}}$	$10.5 \text{ MHz} \leq f_offset < f_offset_{\text{max}}$	-15 dBm	1 MHz

8.2.6 DPD 测试（EVM）

8.2.6.1 测试目的

检测 GaN 功放线性指标误差向量幅度（EVM）是否满足通过准则及指标要求。

8.2.6.2 测试框图

如图 3 所示。

8.2.6.3 测试方法和步骤

按以下步骤测试 GaN 功放线性指标（EVM）：

- a) 按图 3 连接测试系统，打开仪表加电（先不接被测功放），预热 30 min，以保证测试精度；
- b) 接通功放外接电源，预热 10 min~15 min；

- c) 需要将 DPD 工装上的同步信号与频谱仪背后的外部触发相连；
- d) 对相应的测试线缆及耦合损耗进行校准，将射频输出损耗值设置到频谱仪或功率计的偏置中，使得相关仪表的读数等于 GaN 功放的实际输出功率；
- e) 首先打开 GaN 功放栅极电源，其次打开 GaN 功放漏极电源；
- f) 在 GaN 功放漏极电源上观察功放静态电流，保证功放静态电流正常；
- g) 操作 DPD 工装在工作中心频点处输出实际需测试的载波信号并配置为满源；
- h) 逐步增加 DPD 工装输出，直到 GaN 功放输出达到功放额定输出功率 P_{out} ；
- i) 开启 DPD 闭环训练，等待一段时间，保证 DPD 闭环功能完成；
- j) 操作频谱仪，选择载波信号所对应的 EVM 模板，一般设置频谱仪中心频率与载波中心频率保持一致，选择调制方式为 256QAM，检波方式为 RMS，平均次数一般设置为 10 次；
- k) 设置频谱仪同步方式为外部同步，并将 DPD 工装同步信号接口与频谱仪外部同步接口相连；
- l) 对扫描时隙进行设置，然后即可进行 EVM 读数（测试需要 BBU，具体数据源要求请参照 3GPP 相关协议）；
- m) 如果 EVM 值跳动较大，可适当增加 DPD 闭环等待时间或增加频谱仪的平均次数，以便观测更加真实和准确的 EVM 值；
- n) 如果所需测试的信号是其他 5G NR 载波，需针对各载波信号重新配置频谱仪，然后分别进行 EVM 的测试；
- o) 重复步骤 a 到步骤 n，进行其他频点或其他通道（针对多通道的功放）的测试；
- p) 测试结束后，首先关闭 GaN 功放漏极电源，其次关闭 GaN 功放栅极电源。

8.2.6.4 通过准则及指标要求

GaN 功放 DPD 测试（EVM）测试要求在设计要求的额定输出功率下 DPD 闭环开启后其 EVM 应至少满足小于等于 3.5%（满源 256 QAM）。

8.2.7 带外杂散测试

8.2.7.1 测试目的

检测 GaN 功放带外杂散是否满足通过准则及指标要求。

8.2.7.2 测试框图

如图 3 所示。

8.2.7.3 测试方法和步骤

按以下步骤测试 GaN 功放带外杂散：

- a) 按图 3 连接测试系统，打开仪表加电（先不接被测功放），预热 30 min，以保证测试精度；
- b) 接通功放外接电源，预热 10 min~15 min；
- c) 对相应的测试线缆及耦合损耗进行校准，将射频输出损耗值设置到频谱仪或功率计的偏置中，使得相关仪表的读数等于 GaN 功放的实际输出功率；

- d) 首先打开 GaN 功放栅极电源，其次打开 GaN 功放漏极电源；
- e) 在 GaN 功放漏极电源上观察功放静态电流，保证功放静态电流正常；
- f) 操作 DPD 工装在工作中心频点处输出实际需测试的载波信号；
- g) 逐步增加 DPD 工装输出，直到 GaN 功放输出达到功放额定输出功率 P_{out} ；
- h) 开启 DPD 闭环训练，等待一段时间，保证 DPD 闭环功能完成；
- i) 操作频谱仪，一般设置频谱仪中心频率与载波中心频率保持一致，在频谱模式下按照表 5 GaN 功放带外杂散要求中带宽的具体要求依次设置起始频率和终止频率，注意不同起始频率和终止频率下所对应的测试带宽 RBW 不同，一般推荐 $VBW=3*RBW$ ；
- j) 在不同频段和 RBW/VBW 要求下依次测试每个频段的最大值即为该频段的杂散值；
- k) 另外该测试需要在功放输出连接对应频段的滤波器进行测试，注意高频杂散读数对应的衰减与低频的区别，如对检波方式有具体要求的按照相关要求执行，如没有相关要求，频谱仪默认检波设置为 RMS 检波；
- l) 如果带外杂散值跳动较大，可适当增加 DPD 闭环等待时间或增加频谱仪的平均次数，以便观测更加真实和准确的带外杂散值；
- m) 如果所需测试的信号是其他 5G NR 载波，需针对各载波信号重新配置频谱仪，然后分别进行 EVM 的测试；
- n) 重复步骤 a 到步骤 m，进行其他频点或其他通道（针对多通道的功放）的测试；
- o) 测试结束后，首先关闭 GaN 功放漏极电源，其次关闭 GaN 功放栅极电源。

8.2.7.4 通过准则及指标要求

GaN 功放带外杂散测试要求在设计要求的额定输出功率下 DPD 闭环开启后其带外杂散应至少满足表 3 要求。

表3 GaN 功放带外杂散要求

带宽	带外杂散辐射要求（最大）	测量带宽RBW
9 kHz ~ 150 kHz	-36 dBm	1 kHz
150 kHz ~ 30 MHz	-36 dBm	10 kHz
30 MHz ~ 1 GHz	-36 dBm	100 kHz
1 GHz ~ 12.75 GHz	-30 dBm	1 MHz
12.75 GHz ~ 工作频带高端五次谐波频率（单位：GHz）	-30 dBm	1 MHz

8.2.8 谐波测试

8.2.8.1 测试目的

检测 GaN 功放谐波指标是否满足通过准则及指标要求。

8.2.8.2 测试环境

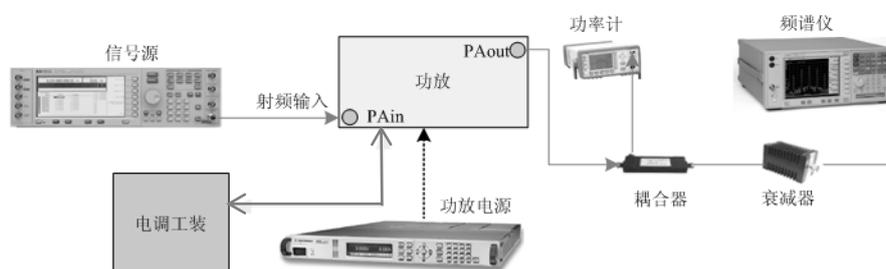


图4 谐波测试框图

8.2.8.3 测试方法和步骤

按以下步骤测试 GaN 功放谐波指标:

- 按图 4 连接测试系统, 打开仪表加电 (先不接被测功放), 预热 30 min, 以保证测试精度;
- 接通功放外接电源, 预热 10 min~15 min;
- 对相应的测试线缆及耦合损耗进行校准, 将射频输出损耗值设置到频谱仪或功率计的偏置中, 使得相关仪表的读数等于 GaN 功放的实际输出功率;
- 注意高次谐波对应的衰减值与基波的区别, 例如高次谐波对应的衰减值比基波大 $\langle A \rangle$ dB, 最终该次谐波的测试结果 (该结果为负值) 要加上 $\langle A \rangle$ dB 才为正确值;
- 首先打开 GaN 功放栅极电源, 其次打开 GaN 功放漏极电源;
- 在 GaN 功放漏极电源上观察功放静态电流, 保证功放静态电流正常;
- 操作信号源在工作中心频点处输出单音信号;
- 逐步增加信号源输出, 直到 GaN 功放输出达到功放额定输出功率 P_{out} ;
- 操作频谱仪, 一般设置频谱仪中心频率与信号源输出单音信号的中心频率保持一致, 在频谱模式下选择谐波模板, 平均次数一般设置为 10 次;
- 在频谱仪上完成二次谐波和三次谐波的读数;
- 重复步骤 a 到步骤 j, 进行其他频点或其他通道 (针对多通道的功放) 的测试;
- 测试结束后, 首先关闭 GaN 功放漏极电源, 其次关闭 GaN 功放栅极电源。

8.2.8.4 通过准则及指标要求

GaN 功放谐波测试要求在设计要求的额定输出功率下 DPD 闭环开启后其谐波为二次谐波 ≤ -45 dBc, 三次谐波 ≤ -55 dBc。

9 数据记录和处理

本文件测试数据记录表参见附录 A。

10 测试报告

测试报告至少应给出以下几方面的内容：

- a) 测试对象；
- b) 本次测试所使用的具体测试要求；
- c) 本次测试所使用的具体测试方法；
- d) 测试数据和结果；
- e) 观察到的异常现象；
- f) 测试人员和日期。

附 录 A
(资料性)
测试数据记录

测试数据记录表参见表 A.1。

表A.1 测试数据记录表

测试对象				测试环境	1. 矢量网络分析仪 (规格型号)				
规格型号					2. 直流稳压电源 (规格型号)				
测试时间					3. 频谱仪 (规格型号)				
测试地点					4. 功率计 (规格型号)				
				5. 信号源 (规格型号)					
				6. 测试工装 (规格型号)					
				7. ...					
序号	测试条目	测试条件		指标要求	1#	2#	3#	测试结果 (Pass/Fail)	备注
1	增益	频率范围、 输入功率等	最大值						
			最小值						
2	增益平坦度		增益最大值						
			-增益最大值						
3	线性动态范围内增益波动	功率范围 (额定功率~ 额定功率- 30dB)	中心频率						
4	EVM	频率范围、 信号模式、 功率大小等	低频点						
			中频点						
			高频点						
5	效率 (%)	频率范围、 信号模式、 功率大小、 电压、电流 等	低频点						
			中频点						
			高频点						
6	ACLR	频率范围、 信号模式、 功率大小、 信号带宽、 载波数量等	低频点						
			中频点						
			高频点						
7	辐射模板	$0.05 \text{ MHz} \leq f_{\text{offset}} < 5.05 \text{ MHz}$		<-14 dBm/100 kHz					
		$5.05 \text{ MHz} \leq f_{\text{offset}} < 10.05 \text{ MHz}$		<-14 dBm/100 kHz					
				<-15 dBm/1 MHz					

		$10.5 \text{ MHz} \leq f_{offset} < f_{offset_{max}}$						
8	带外杂散	9 kHz ~ 150 kHz	<-36 dBm/1 kHz					
		150 kHz ~ 30 MHz	<-36 dBm/10 kHz					
		30 MHz ~ 1 GHz	<-36 dBm/100 kHz					
		1 GHz ~ 12.75 GHz	<-30 dBm/1 MHz					
		12.75 GHz ~ 工作频带高端 五次谐波频率（单位： GHz）	<-30 dBm/1 MHz					
9	谐波	中心频点	2 阶 ≤ -45 dBc					
			3 阶 ≤ -55 dBc					
测试结论				测试人员（签字）				
注：测试条件和测试要求均为示例，请根据实际需求另行编写。								

参 考 文 献

- [1] 3GPP TS 37.104 V16.5.0 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR, E-UTRA, UTRA and GSM/EDGE; Multi-Standard Radio (MSR) Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 16) 第三代合作伙伴计划技术规范组无线接入网 NR, E-UTRA, UTRA 和 GSM/EDGE 多标准无线基站收发标准 (2020-3)。
-

