

具有通道特征评估与校正功能的双通道矢量信号收发器

——HTR2050N306

成都市安谱力电子科技有限公司

附 录

——缩写表

QAM:	正交幅度调制,	Quadrature Amplitude Modulation
EVM:	误差矢量幅度,	Error Vector Magnitude
NMSE:	归一化均方误差,	Normalized Mean Square Error
ACPR:	邻信道功率比,	Adjacent Channel Power Ratio
DPD:	数字预失真,	Digital Pre-Distortion
FPGA:	现场可编程逻辑门阵列,	Field Programmable Gate Array
BER:	误码率,	Bit Error Ratio

目 录

具有通道特征评估与校正功能的双通道矢量信号收发器	1
1 主要特性	5
2 主要应用	5
3 结构介绍	5
3.1 设备介绍	5
3.1.1 设备外观	5
3.1.2 接口介绍	6
3.1.3 设备界面	6
3.2 设备构成	8
3.2.1 中频模块	8
3.2.2 变频模块	9
3.2.3 其他模块	10
4 详细说明	10
4.1 概述	10
4.2 功能框图	11
4.2.1 通道补偿	12
4.2.2 数字预失真	12
4.3 技术指标	14
4.4 详细指标	15
4.4.1 发射 ACPR 测试	15
4.4.2 发射 EVM 和 NMSE 测试	17
4.4.3 收发回环 EVM 和 NMSE 测试	18
5 应用场景	19
5.1 宽带矢量信号的产生与接收	19
5.1.1 实验展示	19
5.1.2 参考代码	21
5.2 功放可线性化程度评估	21
5.2.1 功率校准	21
5.2.2 实验方法	22
5.2.3 结果展示	23
5.3 数字预失真测试	27
5.3.1 实验背景	27

5.3.2	实验方法	27
5.3.3	结果展示	28
5.4	跳频发射机非线性失真测试.....	32
5.4.1	实验背景	32
5.4.2	结果展示	33
5.5	数字双输入发射机实验.....	34
5.5.1	实验背景	34
5.5.2	结果展示	35
5.6	双带并发实验.....	36
5.6.1	实验背景	36
5.6.2	结果展示	37
5.7	变频模组宽带矢量特征测试.....	38
5.7.1	实验方法	38
5.7.2	结果展示	38
6	联系支持	40
7	公司介绍	40

1 主要特性

- 通道数量：2 收 2 发；通道独立；收发独立；
- 射频频率：30 MHz 至 6 GHz；
- 矢量调制带宽：最高 420 MHz；(载波频率>400 MHz)
- 基带采样率：最高 800 MSPS；
- 数据存储深度：单路 512 MB；
- 320 MHz 1024-QAM 信号回环测试 ACPR：-50 dBc (@3.5GHz -10 dBm)
- 320 MHz 1024-QAM 信号回环测试 EVM：1% (@3.5GHz -10 dBm)

2 主要应用

- 宽带矢量信号产生与接收
- 基于矢量信号的射频系统特征测试
- 射频算法验证
- 通信验证系统搭建
- 数字双输入/双带并发系统

3 结构介绍

HTR2050N306 设备结构由中频模块、变频模块、主机模块、电源模块、工控机箱构成。内部模块支持独立使用，二次开发，方案定制。

3.1 设备介绍

3.1.1 设备外观

HTR2050N306 设备外观如图 1 所示，采用 4U 工控机箱，搭载 9 寸液晶触摸屏。





图 1 设备外观

3.1.2 接口介绍

设备正面

- REF IN: 参考时钟输入
- REF OUT: 参考时钟输出
- MARKER: 通道 A 和 B 的 marker 信号
- TRIGGER TX/RX: 发射通道和接收通道的 trigger 信号
- RFout A/B: 发射通道 A/B
- RFin A/B: 接收通道 A/B
- 按键: 开关机
- USB: 3.0 x1

设备背面

- 220V 国标电源
- VGA 视频接口
- USB: 2.0 x2
- 千兆网口

3.1.3 设备界面

HTR2050N306 设备搭载 9 寸液晶触控电容屏, 也可以通过 VGA 视频接口连接外部扩展显示屏进行显示。图 2 展示了运行在触控屏上的设备界面。



图 2 设备界面

框图 1 为子界面切换，包含三个部分：基础设置、通道设置和回环测试；

框图 2 为帮助文档，可以查看设备的使用手册；

框图 3 为基础设置，可以在上面分别设置两个发射通道的频率、平均功率和通道开关，设置两个接收通道的频率和衰减档；并实时显示接收信号的平均和峰值功率；

框图 4 为通道选择和模式设置，发射模式分为低噪声模式和低杂散模式，推荐宽带信号使用低噪声模式；单/多音信号使用低杂散模式；

框图 5 为信号链路设置，基带产生模块中可以选择设备内置的信号，包含单音信号、从 15 MHz 至 320 MHz 宽带信号、跳频信号；基带分析模块中可以实时监测设置通道的信号；预失真器模块可以设置选择内置的预失真 IP 核和开关；接收基带模块可以采集并存储信号到本地；谐波抑制器模块可以设置开关；射频射出模块可以设置输出偏置和相位偏移；射频接收模块可以设置输入偏置；

框图 6 为状态监测，包含 FPGA 温度、ARM 温度实时监测、信号传输进度条、API 网络、监控网络和 Linux 网络监测、接收中频余量和 IP 地址；

框图 7 为通道设置，包含基带产生、预失真器、谐波抑制器、射频输出、基带分析、接收基带和射频接收的具体设置。

3.2 设备构成

在一些小型化场景下，需要其中一些功能嵌入系统，亦或是需要内部模块功能进行二次开发的情况下，HTR2050N306 支持各个模块独立使用与方案定制。

3.2.1 中频模块

HTR2050N306 中频模块采用了先进的第三代 Zynq UltraScale+ RFSoc 架构。其架构结合了 ARM 处理器、FPGA 逻辑单元、高速 ADC 和 DAC、GTY 收发器。该芯片的 14-bit ADC 采样率最高能达到 5 GSPS，14-bit DAC 采样率最高能达到 9.85 GSPS；两组 GTY 收发器，基带传输速率最高可达 200 Gb/s。

数字板具体资源如下：

内存	● PS DDR4 (4 GB, 64 bit, 2666MT/s) ● PL DDR4 (2 GB, 32 bit, 2666MT/s)
PS 接口	● 1x QSPI flash (512 Mb, 4 bit) ● 1x EMMC (8 GB, 8 bit) ● 1x SD card ● 1x 10/100/1000 Ethernet RGMII ● 1x JTAG/UART 调试接口 ● 26x PS IO
PL 接口	● 2x QSFP28 100 GSPS 光口 ● 18x PL HD IO

中频部分包含了滤波器和可调增益放大器，可依据 DAC 和 ADC 的采样率调整中频频率。图 3 展示了中频模块的实物图，图 4 展示了中频模块尺寸图，其中单位为毫米。

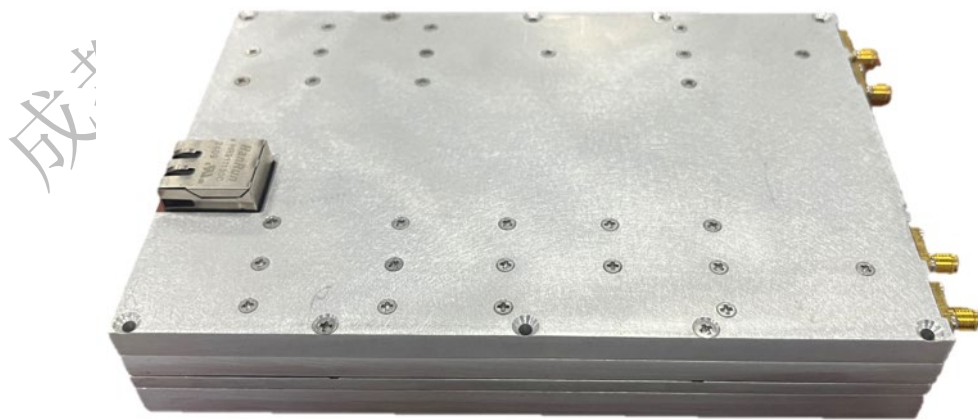


图 3 数字模块实物图

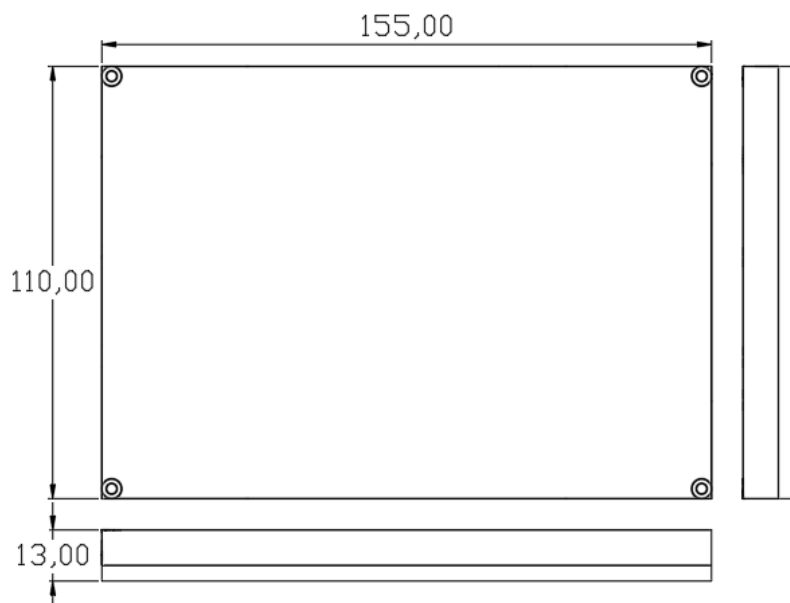


图 4 中频模块尺寸

3.2.2 变频模块

HTR2050N306 采用超外差收发机架构，上下变频均采用固定中频和二次变频的方案。图 5 展示了变频模组尺寸，单位为毫米，具体技术指标在第 4 节展示。

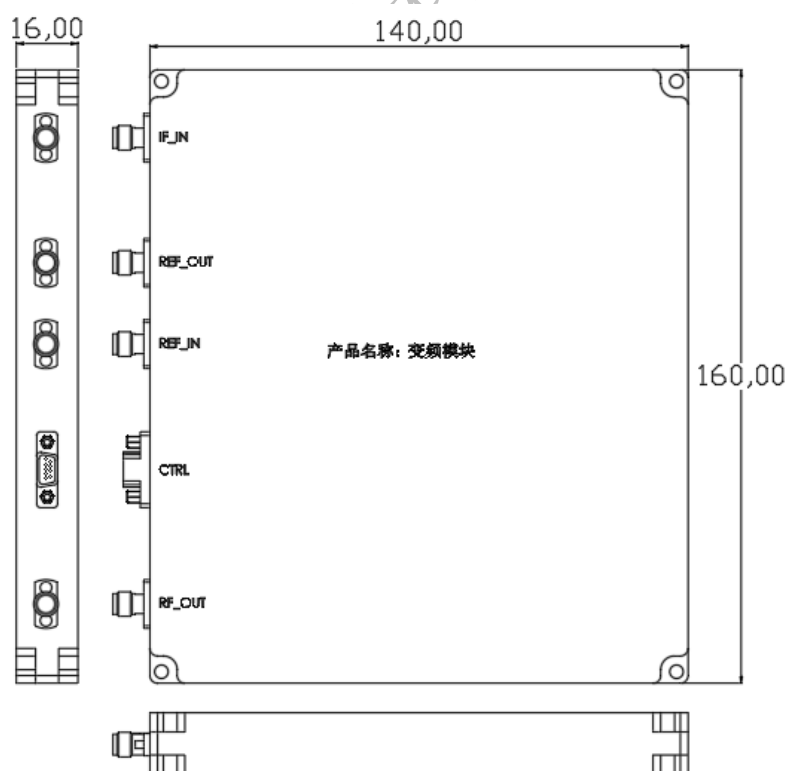


图 5 变频模块尺寸

3.2.3 其他模块

HTR2050N306 设备的主机模块使用标准工控主板，支持 CPU、内存、硬盘大小定制；电源模块使用标准 ATX 电源，支持额定功率 200 W 到 800 W 定制；工控机箱支持大小 1U 到 6U 定制，外部接口定制。

4 详细说明

4.1 概述

HTR2050N306 为双通道矢量信号（任意波包络信号）收发设备，载波频率覆盖 30 MHz 至 6 GHz，矢量调制带宽（任意波包络带宽）420 MHz。发射通道具有独立的频率和功率调节能力。两条发射通道基带同步，具有同步时延调节能力，对外提供触发和同步控制信号。接收通道具有独立的链路增益调节能力，两条接收通道基带同步，具有外部触发功能。最高支持 200 Gb/s 基带数字信号传输。设备典型特征如下：

- 良好的通带性能，载波 400 MHz 至 6 GHz 范围内，320 MHz 64-QAM 信号发射 EVM 0.7%至 1.6%，NMSE 为-41 dB 至-33 dB，ACPR 达到-50 dBc；收发回环 EVM 0.6%至 1.2%，NMSE 为-42 dB 至-32 dB，ACPR 达到-50 dBc；图 6 展示了 HTR2050N306 在 5.8 GHz 中心频率下通道自回环测试的频谱图、星座图、AM-AM/PM 曲线。
- 具有功率放大器、滤波器、变频器等模块在宽带矢量信号激励下的传输特征分析功能，可实时分析待测件 AM-AM/PM 特征、群时延波动、ACPR 恶化量，EVM 恶化量等。
- 具有 DPD 验证功能，支持软件预校正和 FPGA 实时预校正，可评估发射机可线性化程度，验证 DPD 算法。
- 具有射频接入式 DPD 功能，RX-A 连接射频小信号，TX-A 连接功放输入端，RX-B 连接功放反馈端口，可在不改变原有发射机链路条件下实时校正发射机非线性失真。
- 具有功放谐波抑制功能，能支持基波和谐波成分均落在设备支持射频频率 30 MHz 至 6 GHz 内的谐波抑制，可评估功放谐波可抑制程度，验证谐波抑制算法。

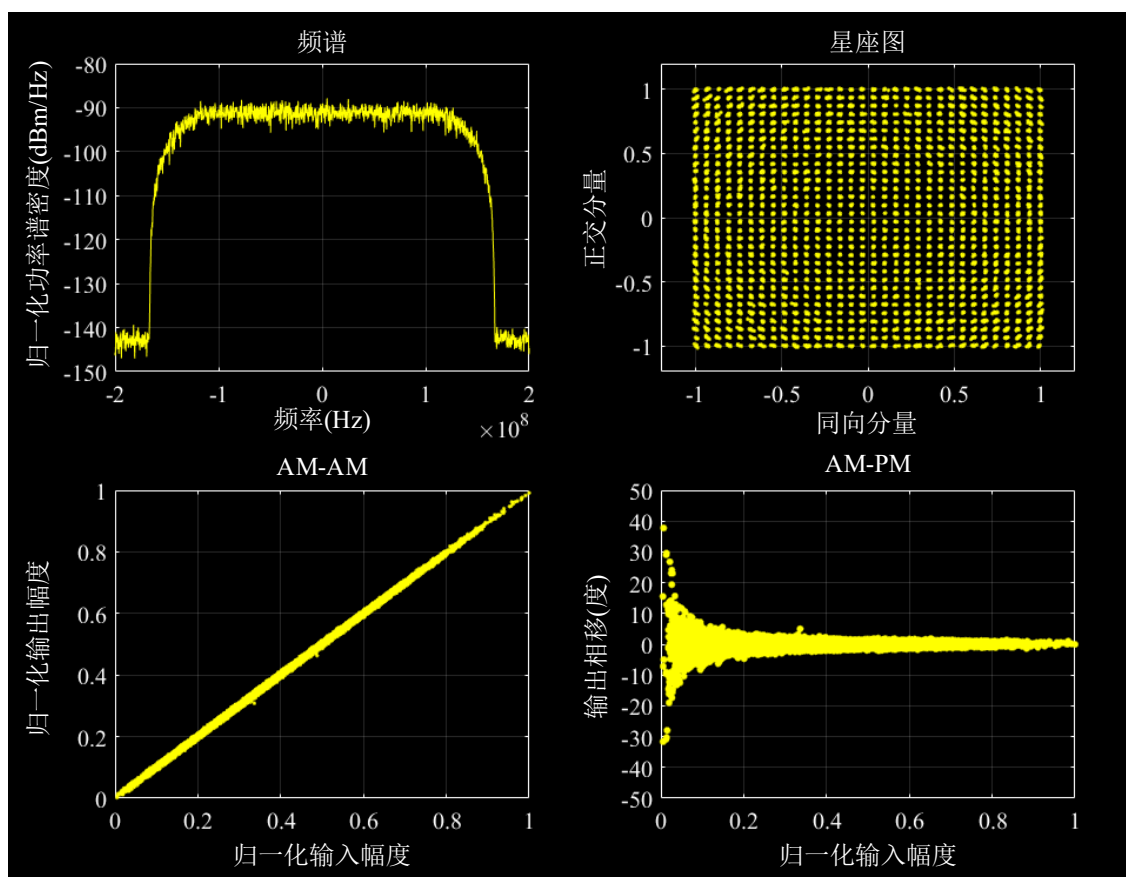


图 6.5.8 GHz 收发回环 320 MHz 1024-QAM 信号测试

4.2 功能框图

设备系统框图如图 7 所示，采用了固定中频架构，变频单元完成中频与射频的相互转换。上位机通过 Linux 系统实现链路的收发控制。

对于发射链路而言，基带信号通过上位机发送至 DDR 中进行缓存，FPGA 读取 DDR 数据进行幅度调节，预失真处理，通道补偿，数字上变频至固定中频，最后送入 DAC；对于接收链路而言，ADC 采集中频信号后通过通道补偿、功率检测后存入 DDR 中供上位机读取。

设备预留了 2 组*4 GTY 接口，通过该接口可直接向发射/接收链路传输基带信号。接收通道 A 的基带数据流可与发射通道 A 基带数据流直接连接以实现信号转发。

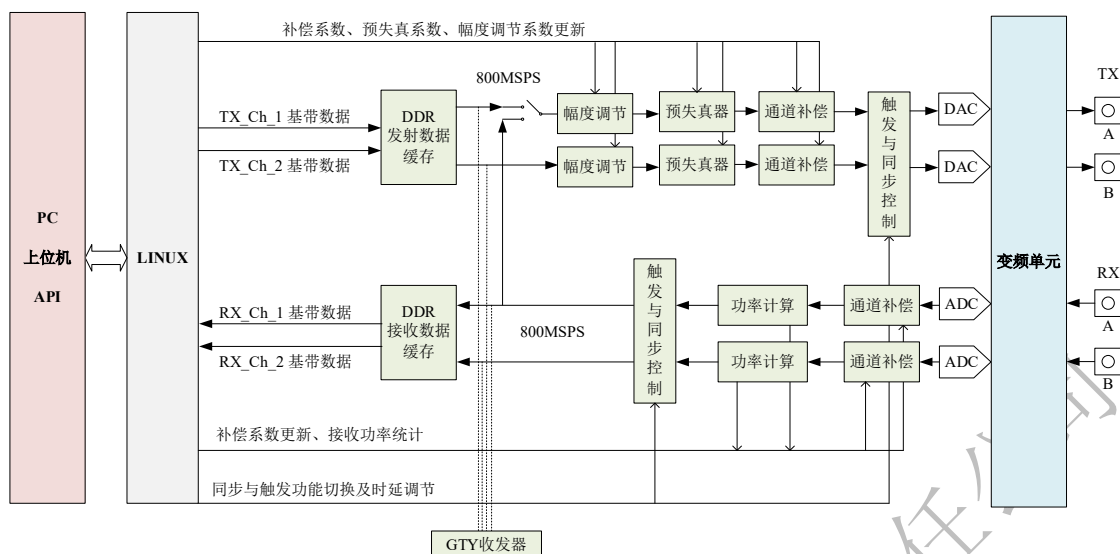


图 7 系统框图

4.2.1 通道补偿

EVM 指标是广为使用的系统级性能指标，许多通信标准将其定义为用于无线局域网（WLAN 802.11）、移动通信（4G LTE、5G）等应用的合规性测试。除此之外，它还是一个极为有用的系统级指标，可通过简单易懂的值来量化系统中所有潜在损害的综合影响。不同于传统的噪声系数、三阶截取点、信噪比等单独性能参数；EVM 指标是反应整个系统的概况，其与给定系统的 BER 密切相关。

DAC 产生中频信号，经过上变频器得到宽带射频发射信号。其中 DAC 会引入量化噪声；本振源也会引入相位噪声；滤波器、开关、混频器、放大器等器件会在不同频率下引入幅度和相位波动。上述的一切现象都会同时降低信噪比和恶化带内失真。对于射频通道，窄带应用如 20 MHz 以下时，由于其频率响应特性变化相对较小，能够靠硬件实现较好的 EVM；但是对于宽带应用如 320 MHz 时，频率响应特性变化较大，单纯靠优化硬件特性提升 EVM 的难度及消耗的资源会呈指数上升。

HTR2050N306 设备内置通道补偿，用数字补偿技术来对射频器件进行优化，可以提高射频器件最终呈现出的性能。通道补偿采用流式处理 IP，针对不同频率、信号带宽、功率和温度进行实时补偿，以实现最高 420 MHz 的补偿效果。经过通道补偿之后设备能在大部分频点下实现 320 MHz 带宽下 EVM 优于 1%，NMSE 优于 -35 dB 的性能。

4.2.2 数字预失真

HTR2050N306 设备内置数字预失真器，包含三种应用场景：

(a) 软件 DPD 预矫正

基于设备内置通道设置和信号收发 API 函数，用户可自定义发射基带信号，经过功放模组再通过接收端进行采样，基于收发基带信号即可进行 DPD 算法验证。

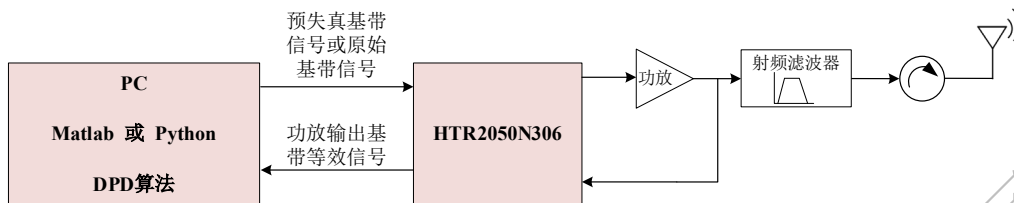


图 8 软件预失真连接示意图

(b) 数据流实时 DPD 预矫正

为了评估 DPD 应用于实际系统后发射机的线性程度，可选择内置于 FPGA 中的预失真器实现预矫正功能。目前预失真器有查找表、多项式、查找表+滤波器、查找表+多项式等 IP 可选。查找表更新方式提供了 C 语言、FPGA、Python、Matlab 四种方式。Python、Matlab 为通用工具，支持各种算法验证。C 语言支持 LS、LMS、RLS 参数更新算法，对模型无限制。FPGA 支持 LMS 和 RLS 参数更新算法，模型目前限定为多项式模型。

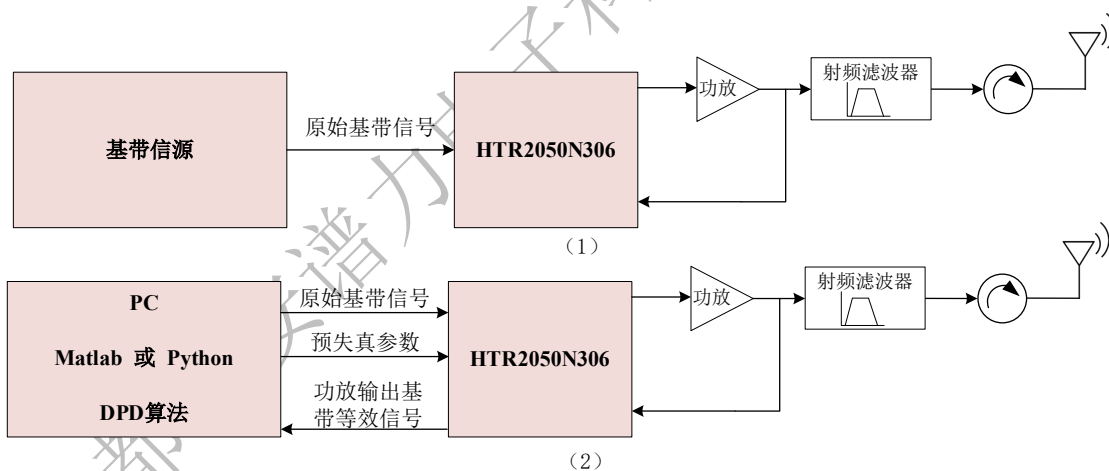


图 9 数据流实时 DPD 连接示意图（1 C 或 FPGA 参数更新，2 Matlab 或 Python 参数更新）

(c) 射频接入式实时 DPD 预矫正

对于发射链路完备的系统，设备具有射频接入式实时 DPD 预矫正的功能。设备可插入发射系统的中频节点或射频节点，该设备在开启 DPD 功能前仅作为信号转发，不会对原有系统造成影响。

开启 DPD 功能后并设定实现目标后，设备会对节点信号和系统末级输出同时进行采样、分析与运算，实时计算得到 DPD 参数，并将该参数送入预失真器中。该模式下，信号流进入预失真器进行预矫正后，再送入节点后的电路中，改善系统末级输出性能指标如 ACPR 和 EVM。

该功能可用于分析数字预失真对系统指标的改善量以便于后续改进，或直接将设备核心模块嵌入系统改善发射机的性能。

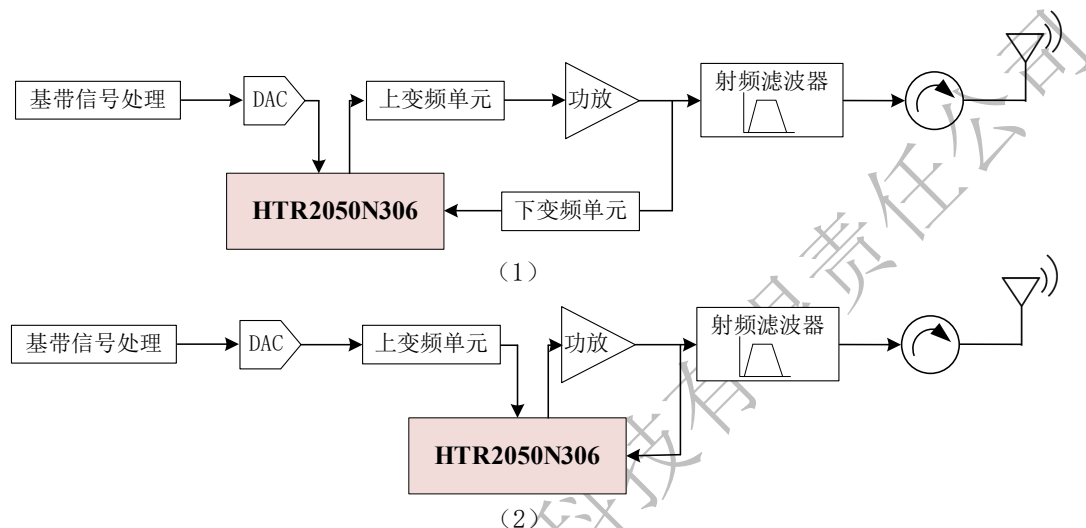


图 10 射频接入式预失真连接示意图（1 中频节点接入，2 射频节点接入）

4.3 技术指标

通道数量	2 收 2 发
射频频率	30 MHz 至 6 GHz 双通道独立调节，收发独立调节
频率调节步进	10 KHz
矢量调制带宽（任意波包络带宽）	420 MHz （载波频率>400 MHz）
输出功率范围	-60 dBm 至 0 dBm
功率调节步进	0.1 dB
输入功率范围	-50 dBm 至 10 dBm
输入衰减器调节范围	0 至 30 dB，步进 1 dB
IQ 信号采样率	最高 800 MSPS
数据存储深度	单路 512 MB
输出 ACPR	320 MHz 信号优于 -50 dBc （-10 dBm 平均功率下测试）
输出 EVM	200 MHz 64-QAM 信号，优于 0.6%（3.5GHz, -10 dBm）

	320 MHz 64-QAM 信号, 优于 1% (3.5 GHz, -10 dBm)
相位噪声	≤ -105 dBc/Hz@10 KHz (频率 1 GHz)
输出谐波	≥ 45 dBc (30 MHz~6000 MHz, 输出功率 0 dBm)
输出杂散	≥ 65 dBc (低杂散模式, 输出功率 0 dBm)
发射同步与触发	内部通道间默认同步, 同步时延可按采样点数量调节, 对外提供通道 1 相关 marker 和 trigger 信号
接收同步于触发	内部通道间默认同步, 可接受外部 trigger 触发采样
频率切换时间	≤ 200 us
输出关断隔离度	≥ 85 dBc
参考时钟输入	10 MHz $\pm$ 10 Hz, 5 dBm $\pm$ 2 dB, 自适应切换
参考时钟输出	10 MHz, 0.1 ppm, 5 dBm $\pm$ 2 dB
工作温度	0 $^{\circ}$ C~+70 $^{\circ}$ C
控制方式	触屏界面; MATLAB API; Python API

4.4 详细指标

4.4.1 发射 ACPR 测试

将 HTR2050N306 设备 RFout A/B 端口连接到罗德与施瓦茨的频谱仪进行测试, 分别得到 60 MHz 和 320 MHz 宽带信号的 ACPR 指标:

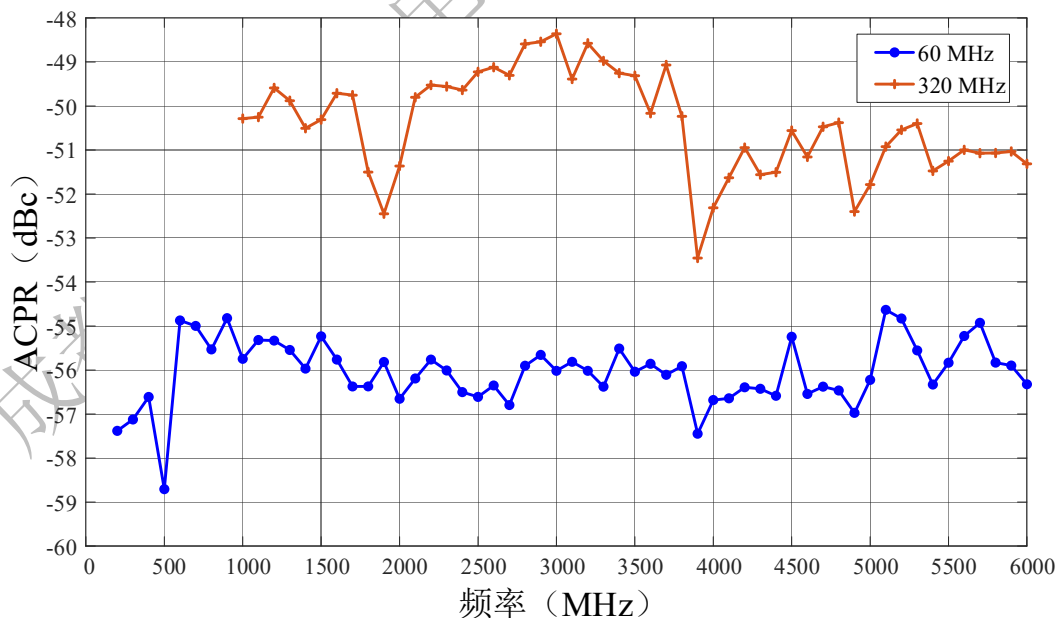


图 11 通道 A 320 MHz 64-QAM 发射信号 ACPR 测试

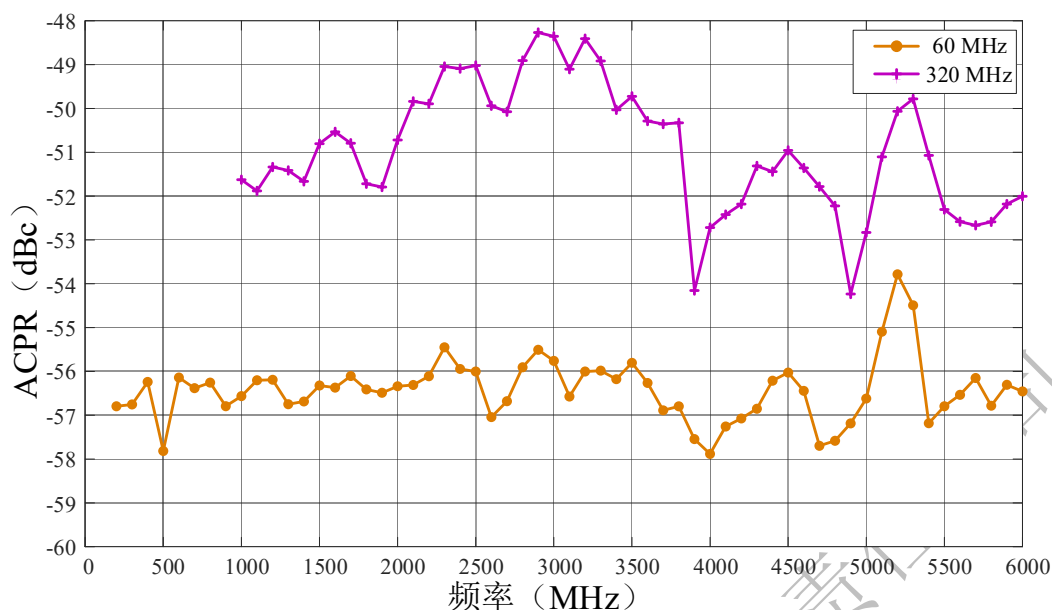
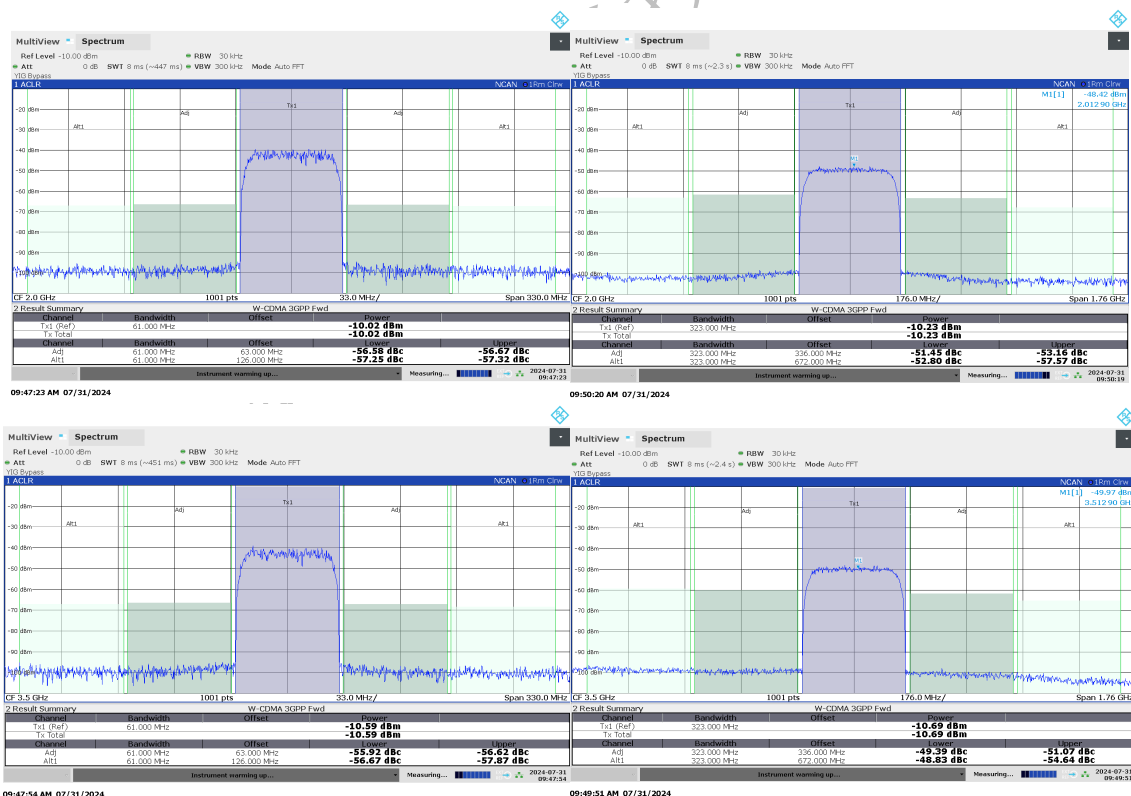


图 12 通道 B 320 MHz 64-QAM 发射信号 ACPR 测试

其中信号带宽 60 MHz/320 MHz 时, 中心频点分别为 2 GHz、3.5 GHz、5.8 GHz 的频谱图。



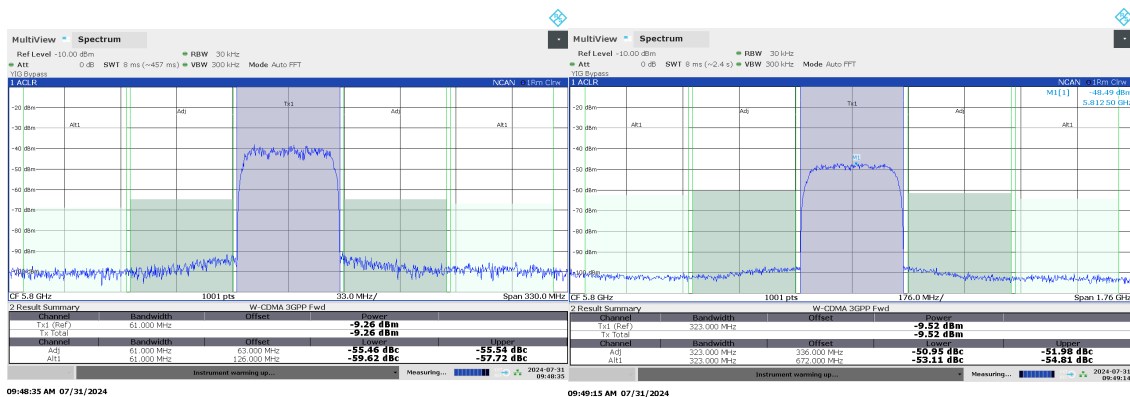


图 13 宽带信号频谱测试结果

4.4.2 发射 EVM 和 NMSE 测试

将 HTR2050N306 设备 RFout A/B 端口连接到罗德与施瓦茨的矢量信号分析仪，采样基带 IQ 信号后，计算得到 320 MHz 宽带信号的 EVM 和 NMSE 指标。

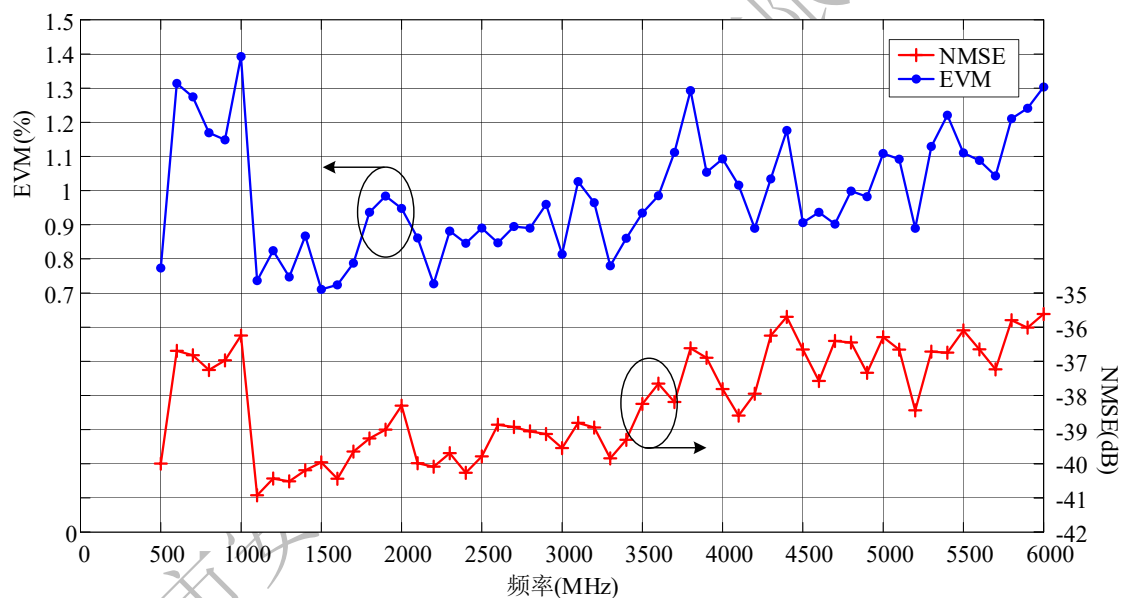


图 14 通道 A 320 MHz 64-QAM 信号发射 EVM 和 NMSE 测试

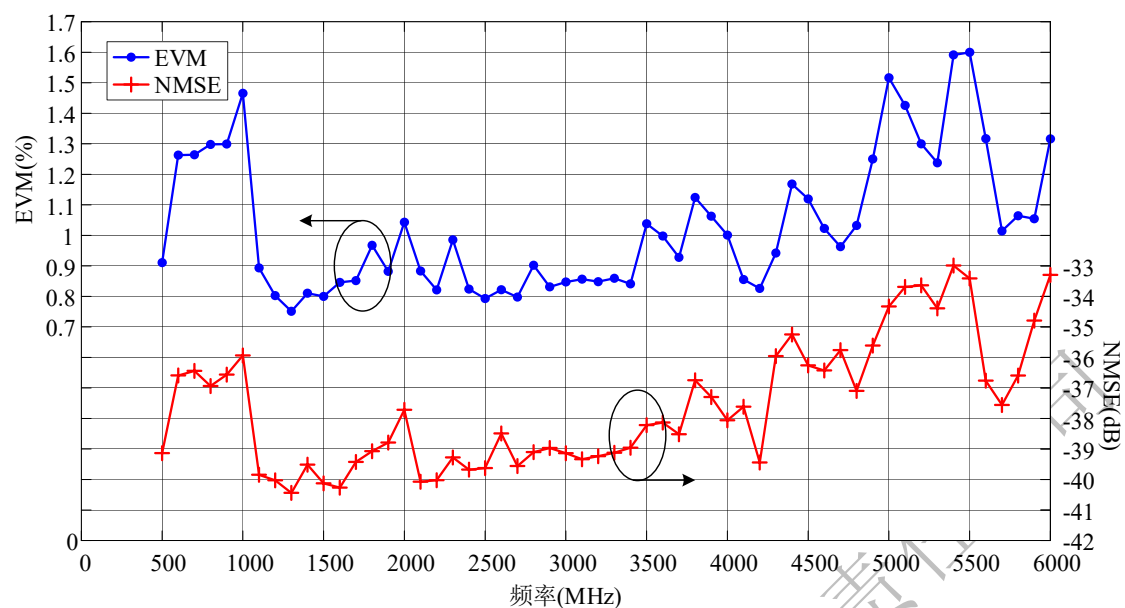


图 15 通道 B 320 MHz 64-QAM 信号发射 EVM 和 NMSE 测试

4.4.3 收发回环 EVM 和 NMSE 测试

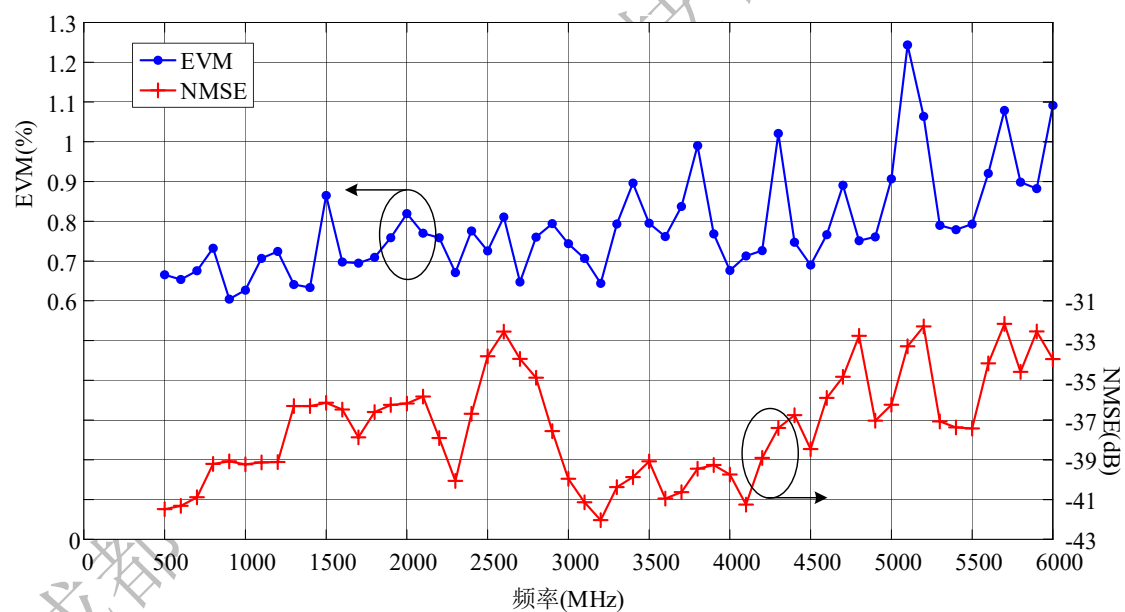


图 16 通道 A 320 MHz 64-QAM 信号收发回环 EVM 和 NMSE 测试

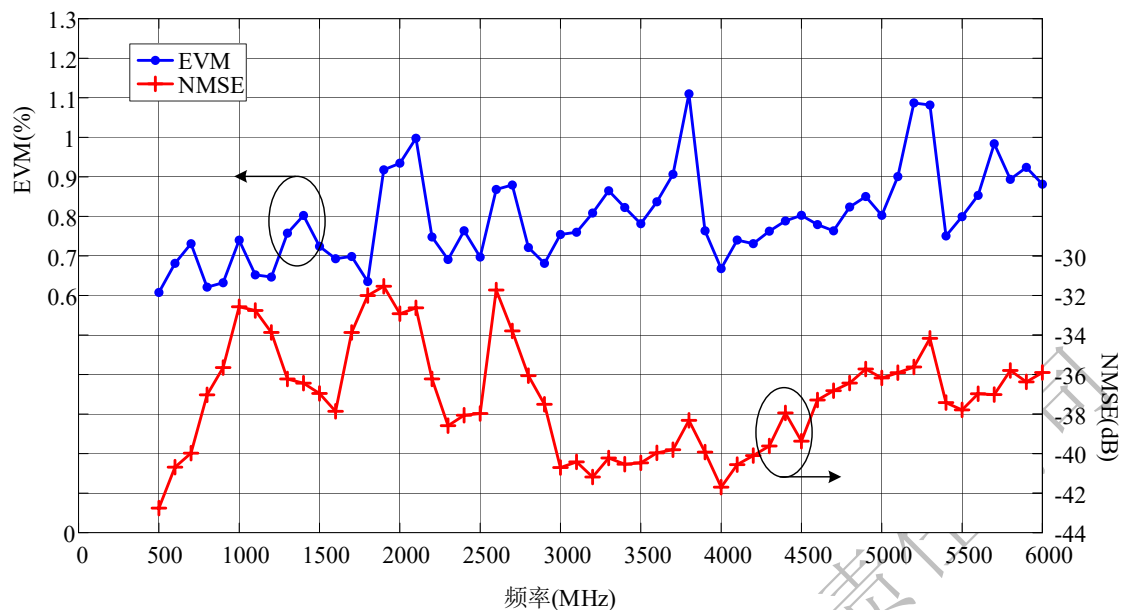


图 17 通道 B 320 MHz 64-QAM 信号收发回环 EVM 和 NMSE 测试

5 应用场景

本节将采用 HTR2050N306 双通道矢量信号收发器来进行一系列应用场景的展示。

5.1 宽带矢量信号的产生与接收

5.1.1 实验展示

本案例展示采用 HTR2050N306 设备产生并接收 320 MHz 1024-QAM 调制信号的实验。将 RFout A 通过同轴线连接 RFin A 后，按照以下步骤设置：

步骤 1：设定发射和接收的通道为 A 路；调用**发射频率设置**函数设置频率为 3.5 GHz；调用**发射功率设置**函数设置平均功率输出 -10 dBm；调用**发射信号加载**函数下载 320 MHz 1024-QAM 宽带调制信号；调用**发射开关设置**函数将通道 A 设置开启；

步骤 2：调用**接收频率设置**函数将频率设置为 3.5 GHz；调用**接收衰减设置**函数将接收衰减档设置为 15 dB；

步骤 3：调用**接收信号采样**函数得到采样信号；计算得到 ACPR、NMSE、EVM 等指标。

设备界面设置展示如图 18 所示，图 19 则展示了采样的频谱、星座图和 AM-AM/PM 曲线。测试指标 ACPR 为 -50 dBc，NMSE 为 -39.6 dB，EVM 为 0.78%。

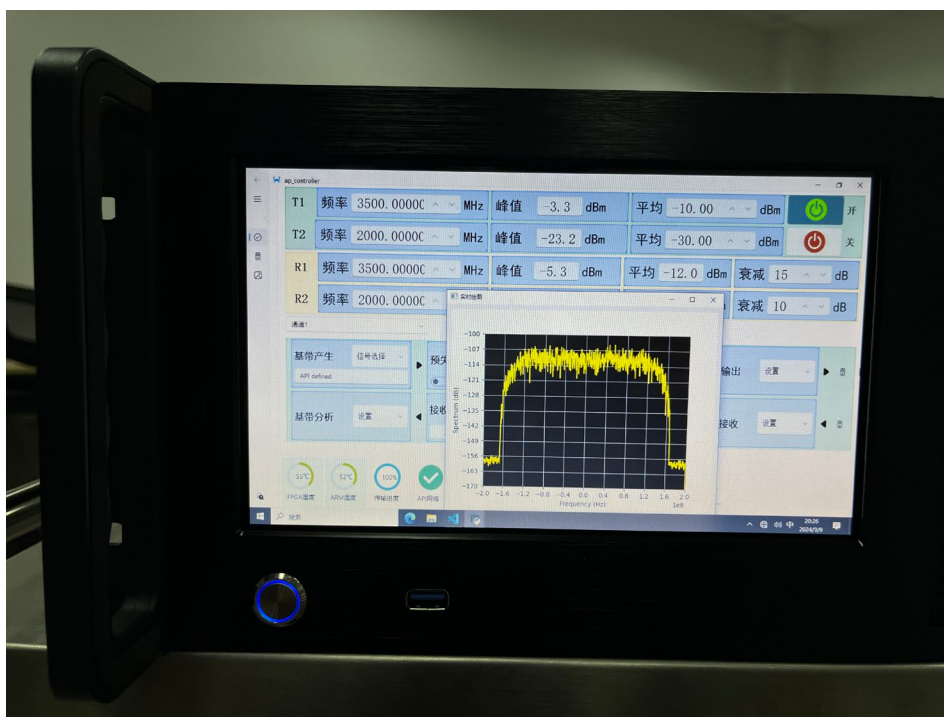


图 18 设备触屏设置显示

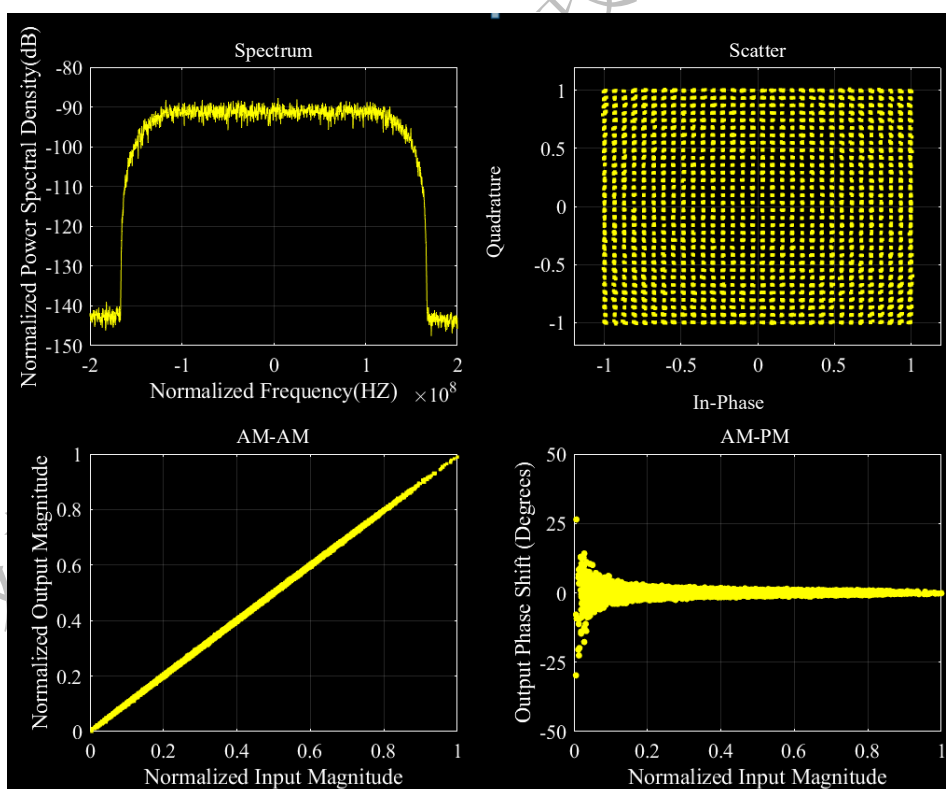


图 19 3.8 GHz 320 MHz 1024-QAM 测试结果

5.1.2 参考代码

使用 Matlab API:

%编写信号

```
load('1024QAM_FS0.8G_BW320M_S3_I128_R0.25.mat');
```

%设置发射频率

```
tx_channel = 1; RFfc = 3500;
```

```
apn306_tx_freqset(tx_channel,RFfc);
```

%设置发射功率

```
meanpower = -10;
```

```
apn306_tx_powerset(tx_channel,meanpower);
```

%加载发射信号

```
apn306_tx_signaldownload(tx_channel,RFfc,x);
```

%设置发射开关

```
apn306_tx_switch(tx_channel,1);
```

%设置接收频率

```
rx_channel = 1; RFfc = 3500;
```

```
apn306_rx_freqset(rx_channel,RFfc);
```

%设置接收衰减

```
rx_att = 15;
```

```
apn306_rx_attset(rx_channel,rx_att);
```

%平均采样信号

```
Ns = length(x); iter = 5;
```

```
y=apn306_rx_signalsample_avg(rx_channel,RFfc,Ns,iter);
```

%信号分析处理

```
y=adjust(x,y); %信号对齐
```

```
NMSE=nmse(x,y); %计算NMSE
```

```
EVM=evm_mqam(x,y); %计算EVM
```

5.2 功放可线性化程度评估

宽带调制信号在经过功放时，会因功放的非线性特性导致输出失真，使得信号的 EVM 下降，同时伴随着频谱再生，即 ACPR 升高。功放的非线性特性可由射频算法或电路（如数字预失真、模拟预失真等）进行矫正，而在算法矫正前可使用 HTR2050N306 对功放进行可线性化程度评估。该算法通过功放实际输出与目标信号之间的差距不断迭代功放输入信号，最终获得功放能够校正的线性度边界。

5.2.1 功率校准

功放可线性化程度评估平台搭建如图 20 所示，使用电脑通过网线发送指令；由设备生成信号并通过 RFout A 端口进行发送；信号经过射频功放之后；先经过

衰减器；再通过一分二功分器送到设备的 RFin A 端口进行采样；另外为了对比观测，功分器的另一个输出端口连接罗德与施瓦茨的频谱仪。

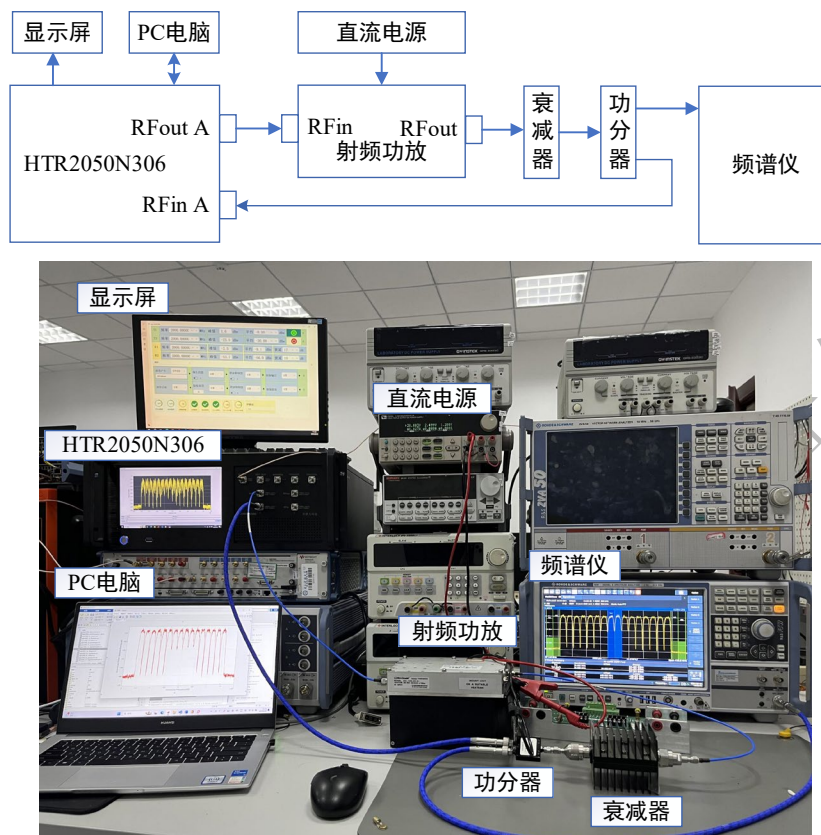


图 20 功放可线性化程度评估平台

若需要测量功放实际功率输出，需要先对通道功率进行校准，校准步骤如下：

步骤 1：将 RFout A 端口通过同轴线缆连接到功率计上；根据需要使用的频段设置通道 RFout A 的频率和功率；输出单音或宽带信号并打开通道 RFout A 开关；读取功率计读数；根据功率计读数和设定功率的差值设置通道 RFout A 的射频偏置；输出功率校准完成，此时 RFout A 设置和显示输出功率与待测件输入功率一致。

步骤 2：将待测件从系统中暂时移除，将待测件输入同轴线与其输出同轴线进行直连；读取 RFin A 通道的功率；根据设定的功率和读取的功率插值设置 RFin A 的射频偏置；输入功率校准完成，此时 RFin A 读取功率与待测件输出功率一致。

5.2.2 实验方法

待设备连接完毕后，即进行功放可线性化程度评估。本案例评估一个功放在不同功率输出下的可线性化程度，功放型号为 DL13T18P05，为安谱力自研的一款高效率功放模组。其内部采用提升回退效率的 Doherty 功放架构，饱和功率为 43 dBm；

其在回退 37 dBm 输出功率时有 40%的整机效率。频带为 1.35 GHz 至 1.8 GHz，小信号增益为 47 dB。

代码基于 Matlab API 进行控制，信号使用 60 MHz 64-QAM 信号，中心频率选择 1.6 GHz，步骤如下：

步骤 1：设定发射和接收的通道为 A 路；调用**发射频率设置**函数设置频率为 1.6 GHz；调用**发射信号加载**函数下载信号为 60 MHz 64-QAM 信号；调用**发射功率设置**函数使得功放平均功率输出为 36dBm；调用**发射开关设置**函数将通道 A 设置开启。

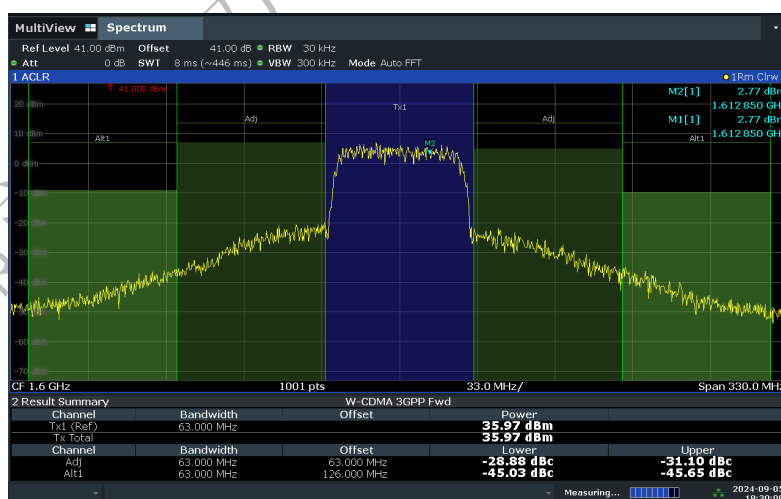
步骤 2：调用**接收频率设置**函数将接收端的频率设置为 1.6 GHz；调用**接收衰减设置**使得 RX1 IF 余量为 2-5 dB 之间。

步骤 3：调用**接收信号采样**函数得到采样信号；调用评估算法更新功放输入信号；多次迭代得到功放校正后的输出；计算得到 ACPR 指标。

步骤 4：增大输出功率 1 dBm，重复步骤 3，记录功放在不同功率下的可线性化程度。

5.2.3 结果展示

DL13T18P05 功放的峰值功率为 43 dBm，加载的信号峰均比为 7 dB 左右，分别对功放输出平均功率 36 dBm 至 41 dBm 时进行可线性化程度评估，测试输出功率间隔 1 dB。图 21 展示了输出功率 36 dBm 时的频谱，此时功放的可线性化 ACPR 为-53.1 dBc/-52.4 dBc。



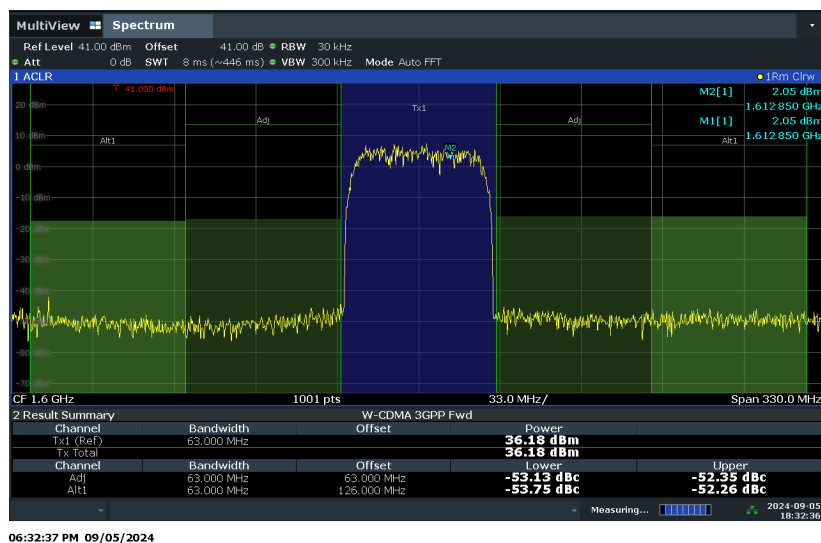


图 21 采用可线性化评估算法前后功放输出功率 36dBm 频谱

图 22 展示了此时的 AM-AM 和 AM-PM 曲线，可以看出在此功率下，功放的幅度和相位都能通过线性化技术进行有效的校正。

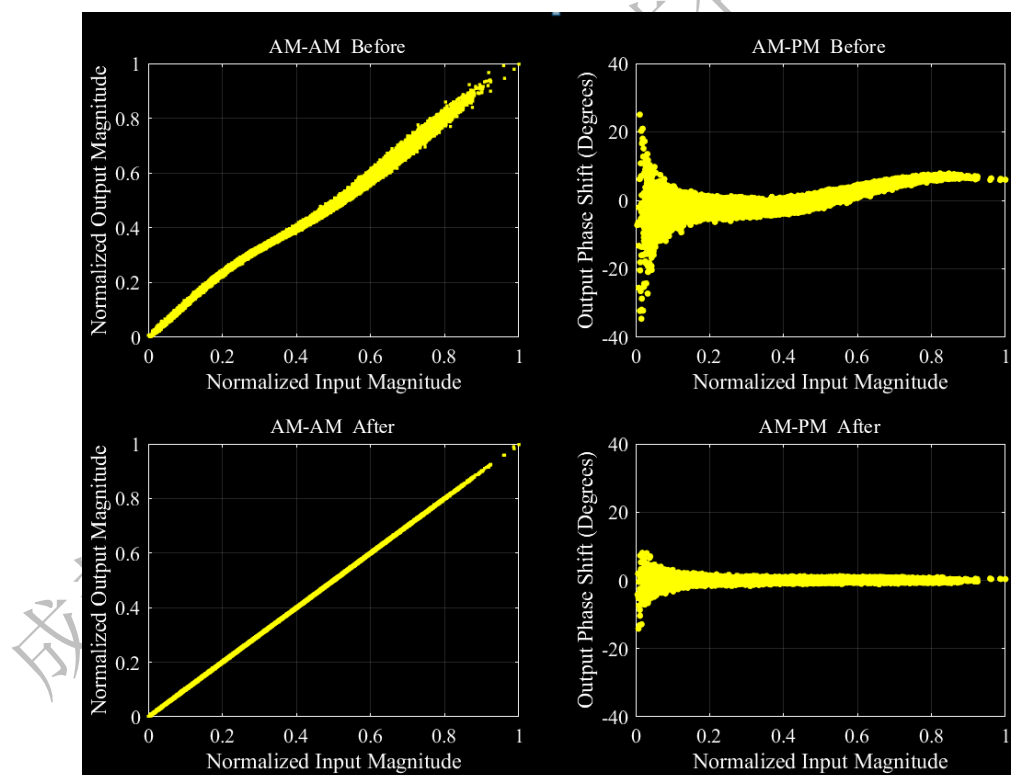
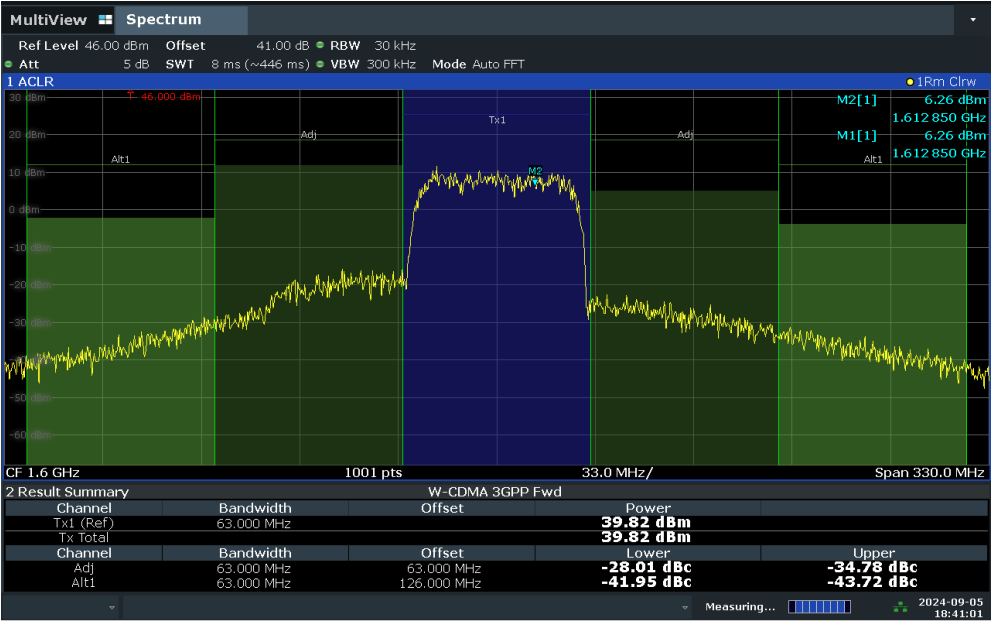
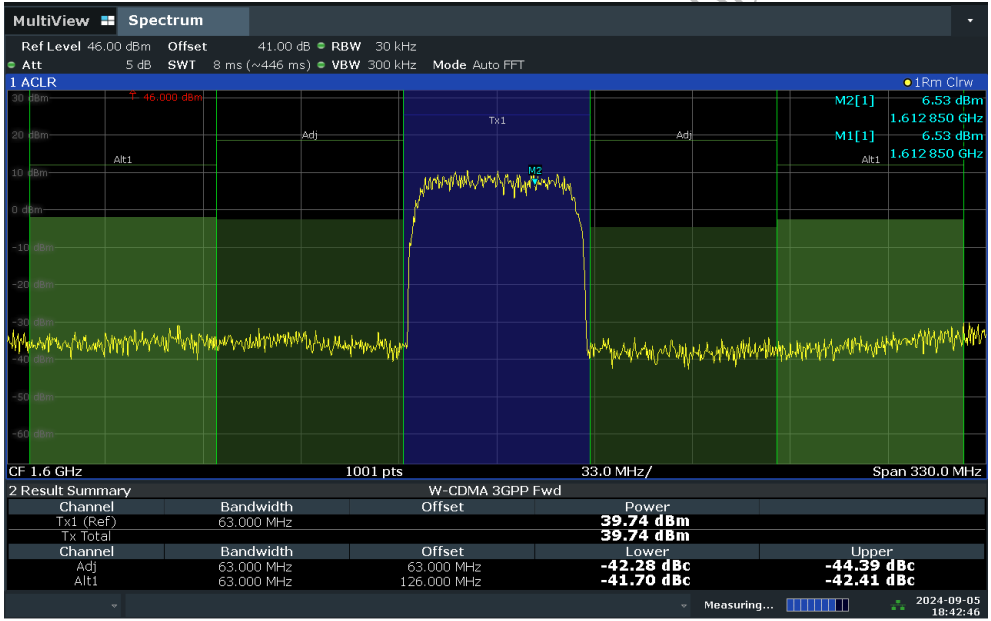


图 22 采用可线性化评估算法前后功放输出功率 36 dBm AM-AM AM-PM 曲线

图 23 展示了输出功率 40 dBm 时的频谱，此时功放的可线性化的 ACPR 相对 36 dBm 时退化为-42.3 dBc/-44.4 dBc。



06:41:02 PM 09/05/2024



06:42:47 PM 09/05/2024

成都

图 23 采用可线性化评估算法前后功放输出功率 40 dBm 频谱

图 24 展示了此时的 AM-AM 和 AM-PM 曲线，可以看出在此功率下，功放已经进入饱和区，可线性化程度变差。

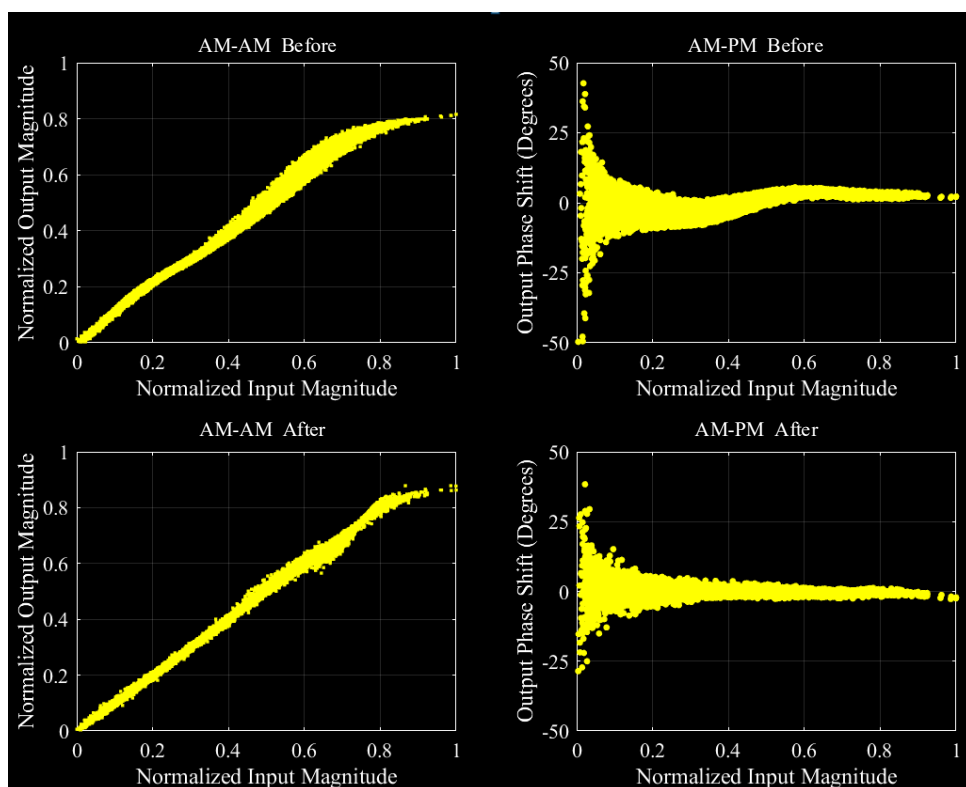


图 24 采用可线性化评估算法前后功放输出功率 40 dBm AM-AM AM-PM 曲线

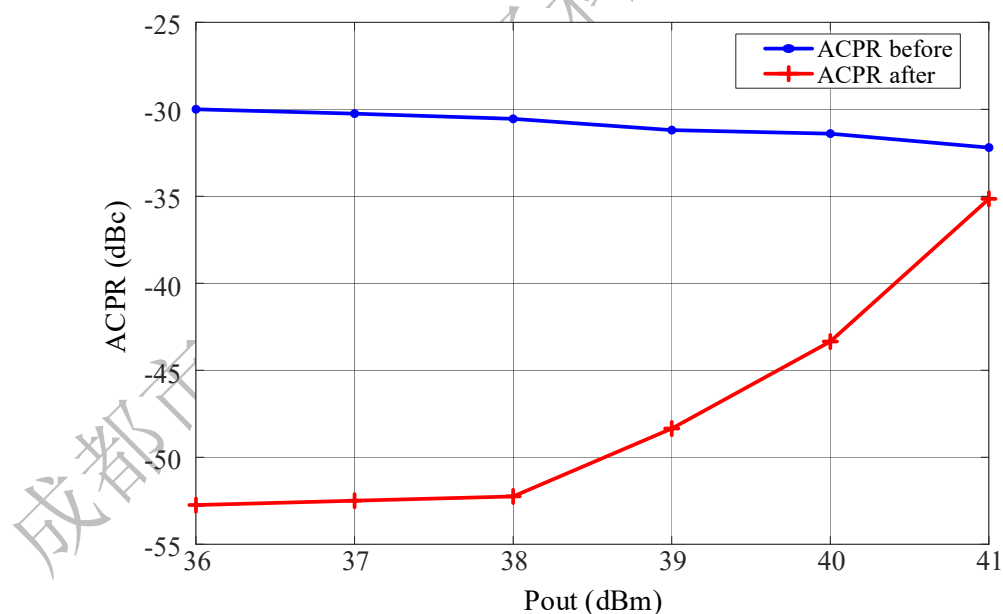


图 25 功放不同输出功率下的可线性化程度评估

图 25 展示了功放在不同输出功率下的可线性化程度评估,在输出功率 38 dBm 以下时,功放 ACPR 均能矫正到-50 dBc 以下,而随着功率进一步上升,其矫正效果也在逐渐的降低,到 41 dBm 输出功率时矫正前后已无太大改变。

5.3 数字预失真测试

5.3.1 实验背景

对一个功率放大器进行数字预失真处理可分为特征提取、参数辨识和信号预失真三个阶段，整个过程均在基带进行处理，一般以 IP 核的形式实现。图 26 给出了一个典型的数字预失真实现框图。其中预失真器的作用是对信号进行预矫正，其关键在于预失真模型的选择。需要注意的是，由于放大器的输入和输出信号均是射频带通信号，其行为模型大都建立在射频域，而数字预失真处理的是基带信号，所需要的是放大器特征的基带表达式。

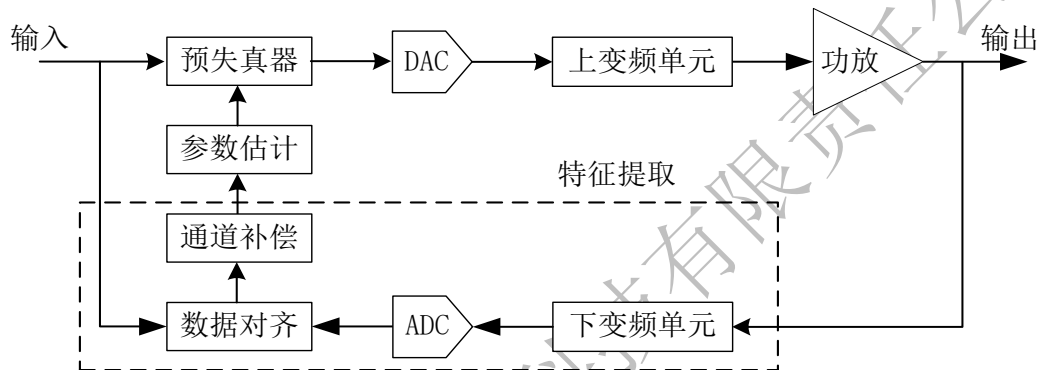


图 26 数字预失真实现框图

根据功放的非线性来产生逆特性信号的预失真方法已经成为了现代移动通信系统中广泛运用的线性化手段。如所示，功放前的预失真模块具有与功放相反的非线性特性，两者级联就能达到线性化功放的目的。

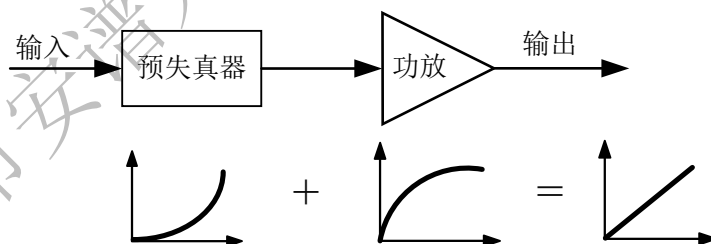


图 27 预失真基本结构和原理

5.3.2 实验方法

HTR2050N306 设备内置流式 DPD IP 核，用户可将 DPD 参数通过 API 进行传递，并开启 DPD 功能，实现对发射机非线性的实时矫正。

本案例中设备连接方式和图 20 一致。由 HTR2050N306 生成信号并通过 RFout A 端口进行发送；信号经过射频功放之后；先经过 40 dB 衰减器；再通过一分二功

分器送到设备的 RFin A 端口进行采样；另外为了对比观测，功分器的另一个输出端口连接罗德与施瓦茨的频谱仪。

本案例中的代码基于 Matlab API 进行控制，测试了单载波 30 MHz 64-QAM 和 16 载波 320 MHz 64-QAM 的 DPD 性能，步骤如下：

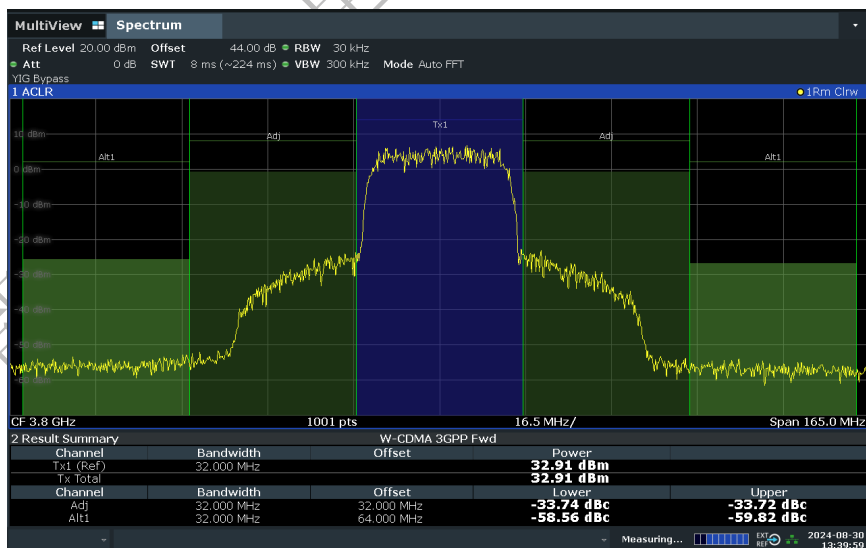
步骤 1：调用**发射信号加载**函数设定通道、频率、下载信号；调用**发射开关设置**函数将通道 A 设置开启。

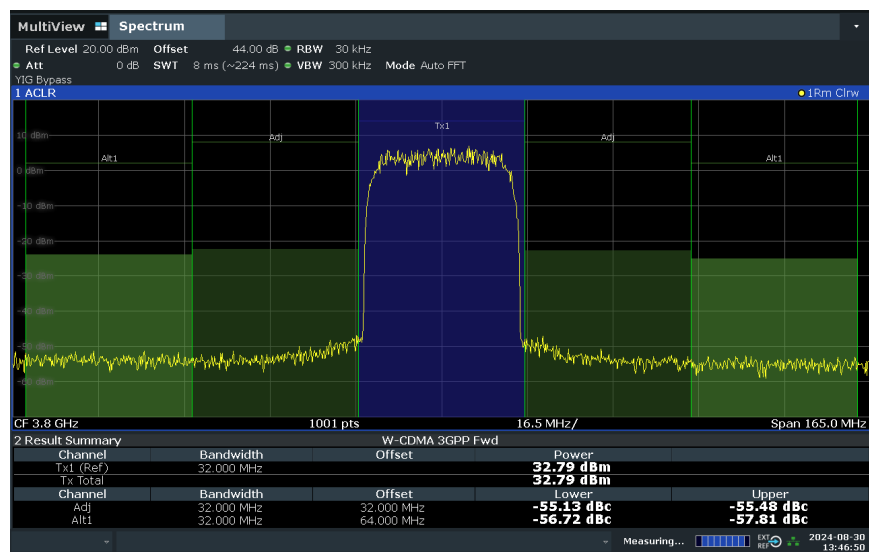
步骤 2：调用**接收频率设置**函数设定接收频率；调用**发射功率设置**函数逐步增大输出功率，通过**接收功率读取**判断功放输出功率是否达到目标值；调用**接收衰减设置**使得 RX1 IF 余量为 2-5 dB 之间。

步骤 3：调用**接收信号采样**函数得到采样信号；使用 DPD 算法求解预失真器参数；调用**数字预失真参数传递**函数将计算得到的参数传递到流式处理器；计算得到 ACPR、NMSE、EVM 指标。

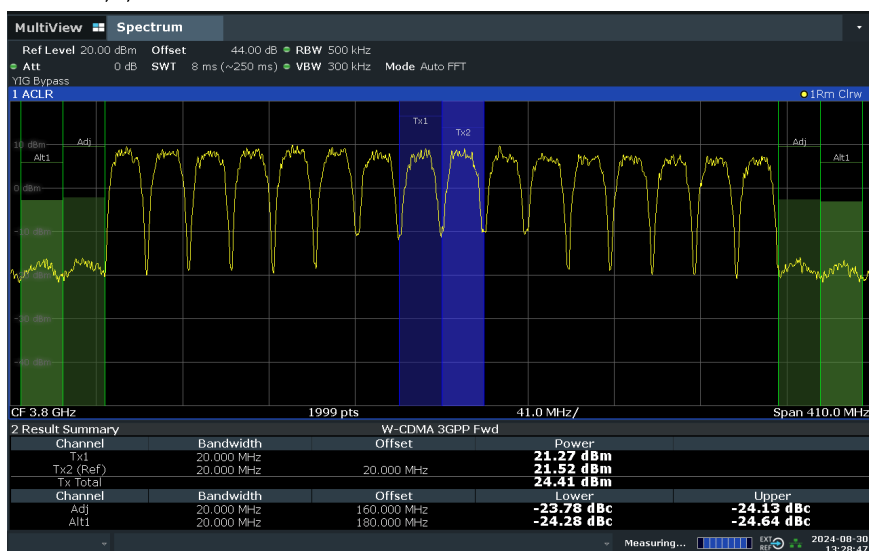
5.3.3 结果展示

分别展示了单载波 30 MHz 64-QAM 信号和 16 载波 320 MHz 64-QAM 经过 DPD 前后的频谱，30 MHz DPD 的 ACPR 从 -33 dBc 改善到了 -55 dBc，改善量达到了 22 dB；320 MHz DPD 的 ACPR 从 -24 dBc 改善到了 -40 dBc，改善量为 16 dB。若要获得更佳适配于系统的 DPD 效果，则需要依据功放行为特征，定制预失真器 IP 核。

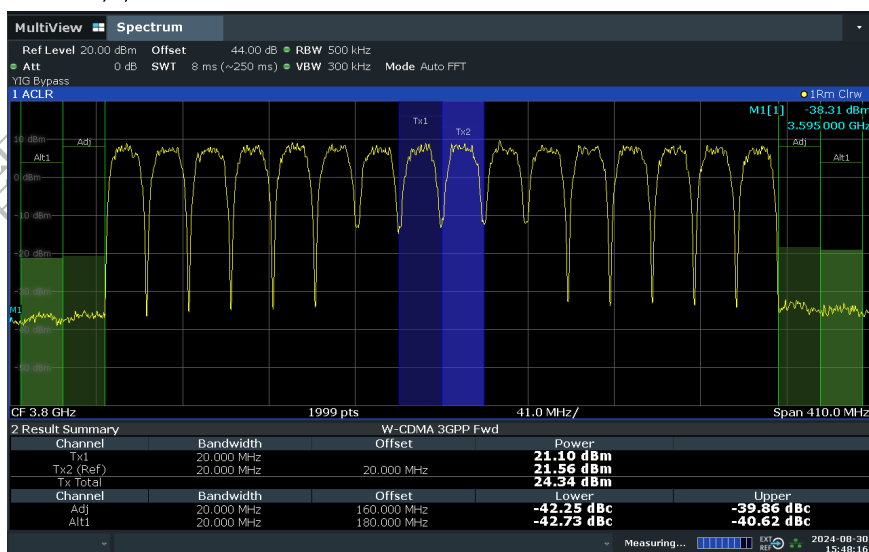




01:46:50 PM 08/30/2024



01:28:47 PM 08/30/2024



03:48:17 PM 08/30/2024

图 28 宽带信号 DPD 前后频谱对比

在功放经过 DPD 前后，30 MHz DPD 的输出的 NMSE 和 EVM 分别从-25 dBc 和 3.97%改善到了-43 dBc 和 0.62%；320 MHz DPD 的输出 NMSE 和 EVM 分别从-22 dBc 和 5.1%改善到了-36 dBc 和 1.24%。图 29 展示了 DPD 前后的星座图对比，其中上面两图分别为 30 MHz 宽带信号 DPD 前后对比；下面两图分别为 320 MHz 宽带信号 DPD 前后对比。

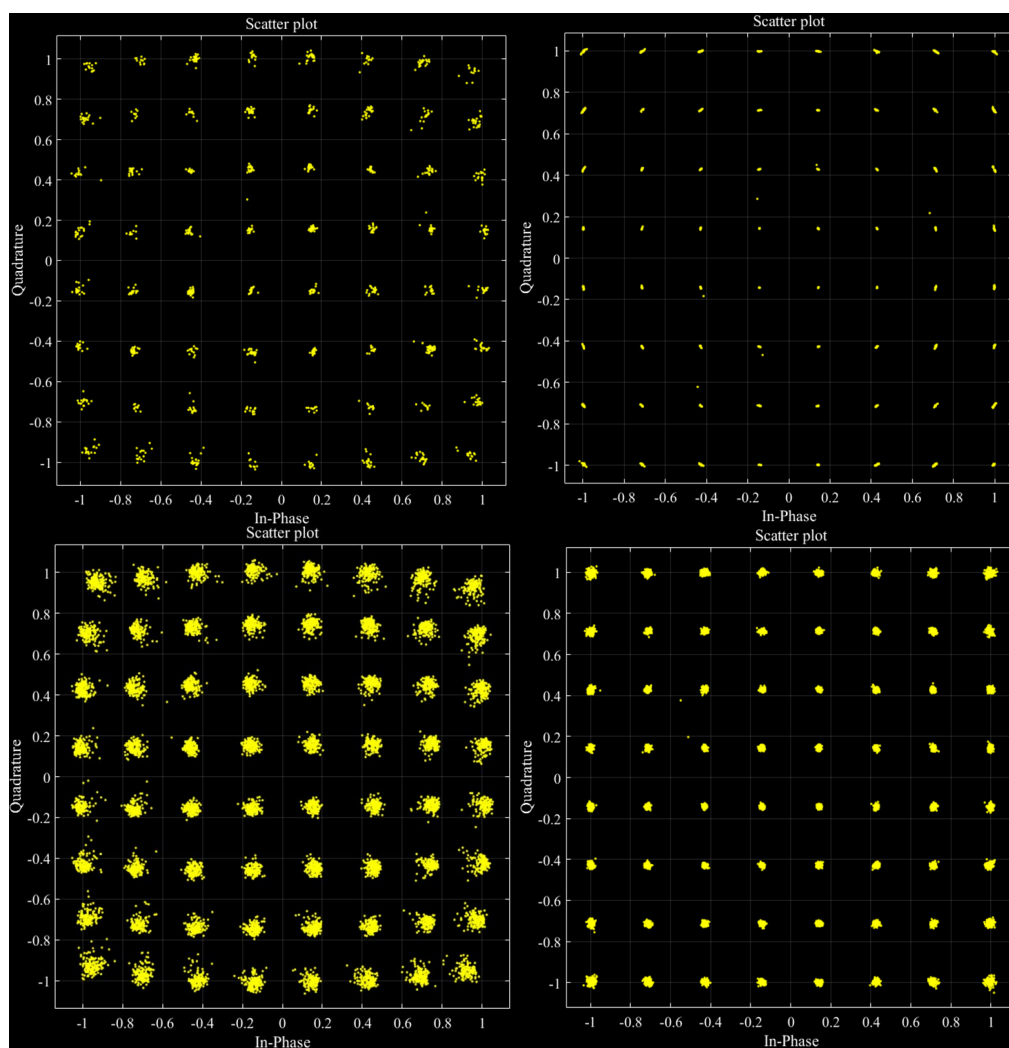


图 29 30 MHz/320 MHz DPD 前后星座图对比

图 30 和图 31 分别展示了 30 MHz 和 320 MHz 宽带信号激励下，DPD 前后功放输出的 AM-AM 和 AM-PM 曲线，可以看出采用 DPD 算法之后，其幅度和相位特性都得到了很大的改善。

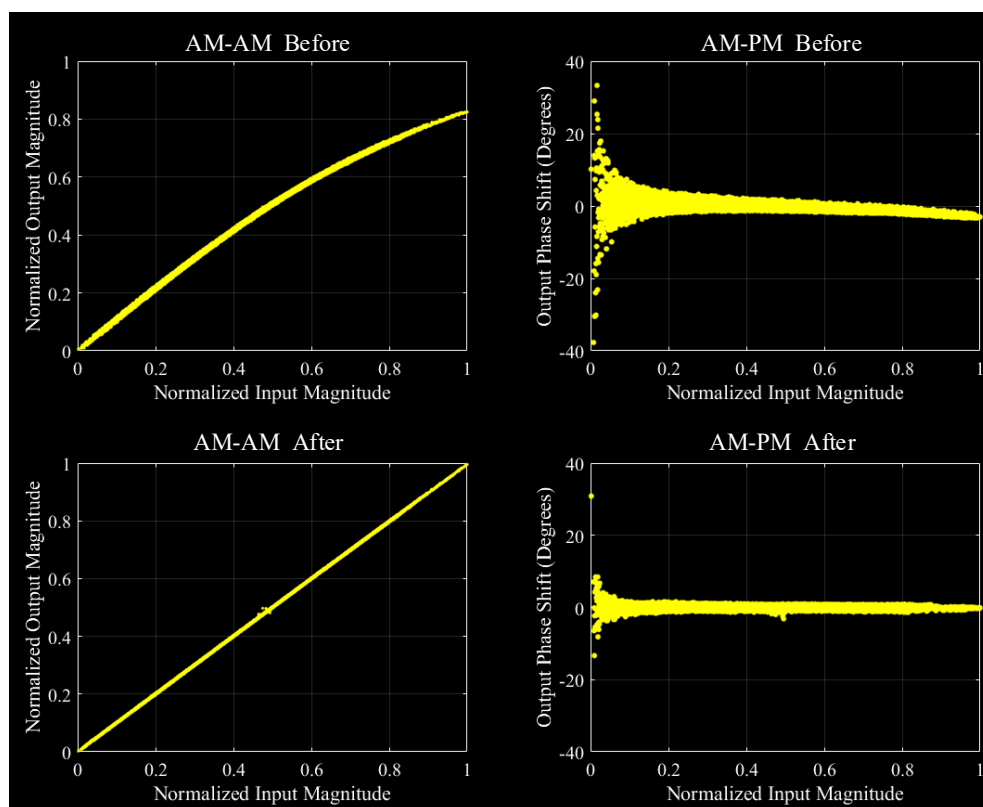


图 30 30 MHz 信号 DPD 前后 AM-AM/AM-PM 曲线

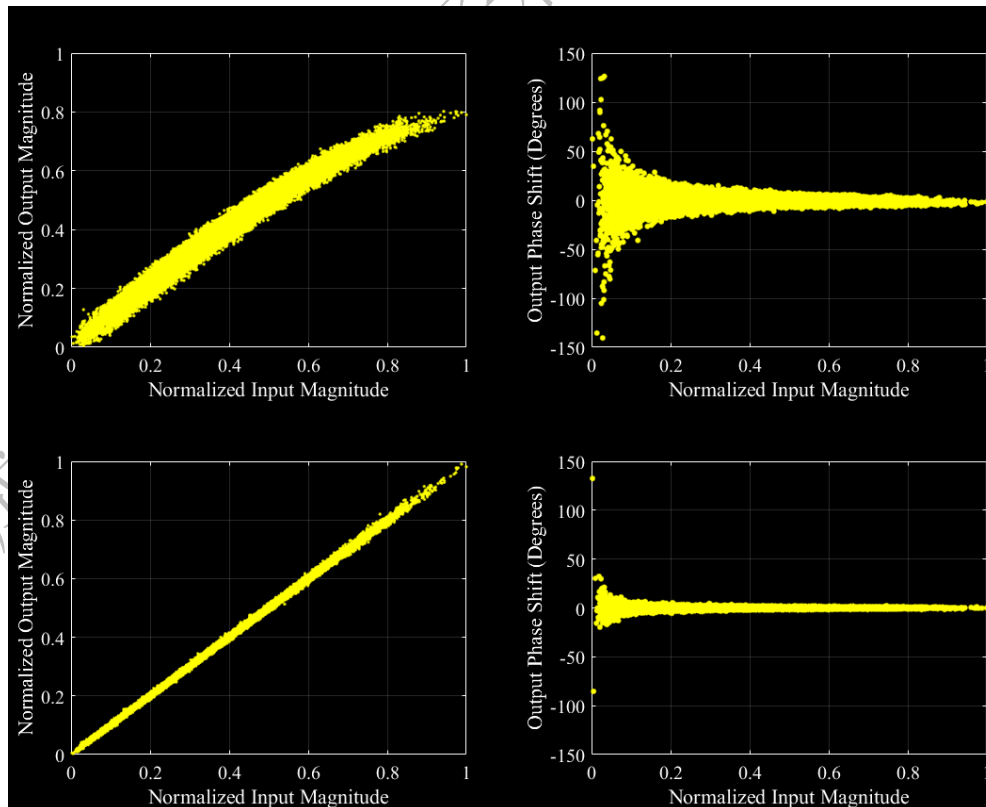


图 31 320 MHz 信号 DPD 前后 AM-AM/AM-PM 曲线

5.4 跳频发射机非线性失真测试

5.4.1 实验背景

对于宽带无线发射机而言，由于链路中各个模块的记忆效应，激励信号统计特征变化会导致发射机非线性传输特征不同。在跳频通信系统中，系统载波频率随时间快速跳变，直接使用固定载波频率激励信号测试发射机的非线性失真特征是不够准确的，需要考虑在跳频状态下直接测试发射机的非线性失真。

图 32 给出了跳频信号经过发射机前后的信号变化的示意图。图 33 给出了跳频状态下功放输入信号的变化示意图。

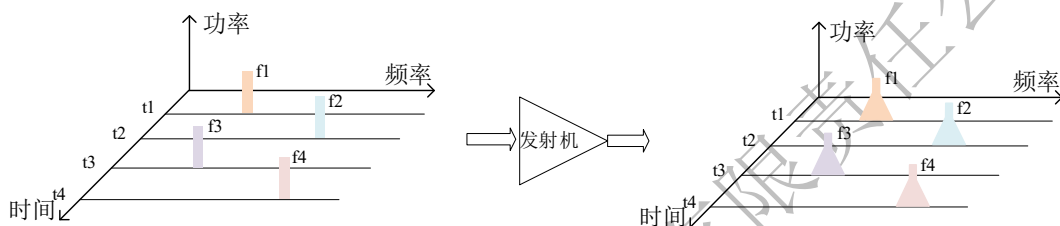


图 32 跳频发射机信号变化示意图

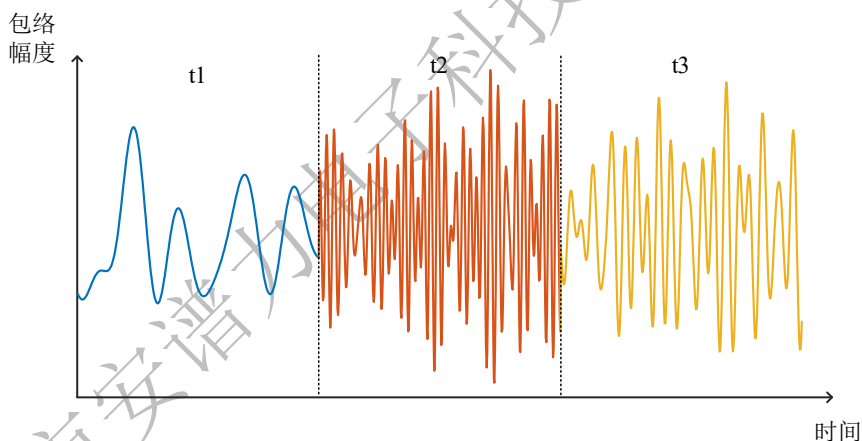


图 33 跳频信号波形示意图

当发射机在跳频工作时，通过常规的频谱分析仪将难以准确观测到信号经过发射机后的频谱再生情况。我们可以通过一个案例简单分析原因，假设信号跳频速率为 1 万跳，瞬时信号带宽为 20 MHz，为了准确观测到非线性失真特征，需要观测 5 倍信号带宽，即 100 MHz。这就意味着频谱仪需要在 0.1 ms 内完成 100 MHz 带宽的频谱分析，同时为了保障频谱分析的精细度，假设 RBW 带宽至少需要少于 1 MHz。在这样 RBW 约束下的绝大部分频谱仪都无法实现 0.1 ms 以内的扫描时间。此外即使频谱仪能够完成上述扫描，还需要配合严密的触发逻辑我们才可以观测到稳定的频谱。

基于上述分析我们认为，对于跳频发射机非线性测试而言，更加合理准确地方法是采用大带宽的矢量信号采集设备，完整的记录发射机输出包络波形，结合一定的信号分析手段，实现发射机在不同跳频点的失真测试。

5.4.2 结果展示

基于上节分析，本节展示一种基于 HTR2050N306 的跳频发射机非线性失真测试方法。发射机工作条件：跳频速率 1 万跳（周期 100 μ s），瞬时信号带宽 20 MHz，信号调制方式 16-QAM，跳频范围 1.4 GHz 至 1.8 GHz。设备设置中心频率为 1.6 GHz，连续采集 10 ms 功放输出信号。

图 34 给出了采样结果包络幅度及对应的跳频标记。将信号按跳频标记进行拆分后进行频谱估计可得到不同时刻发射机输出频谱，如图 35 所示。基于该方法可准确测试跳频发射机在不同频点的 ACPR、IMD 等频域非线性指标。同理通过将拆分后的采样信号与原始信号进行对齐后，也可以完成 EVM、NMSE 等时域非线性指标的测试。

进一步地，上述方式还有助于我们分析跳频发射机更多需要关注的问题，例如跳频时间保护间隔对下一频点起始信号的影响，跳频点间载波频率变化量对下一频点工作特征的影响等。

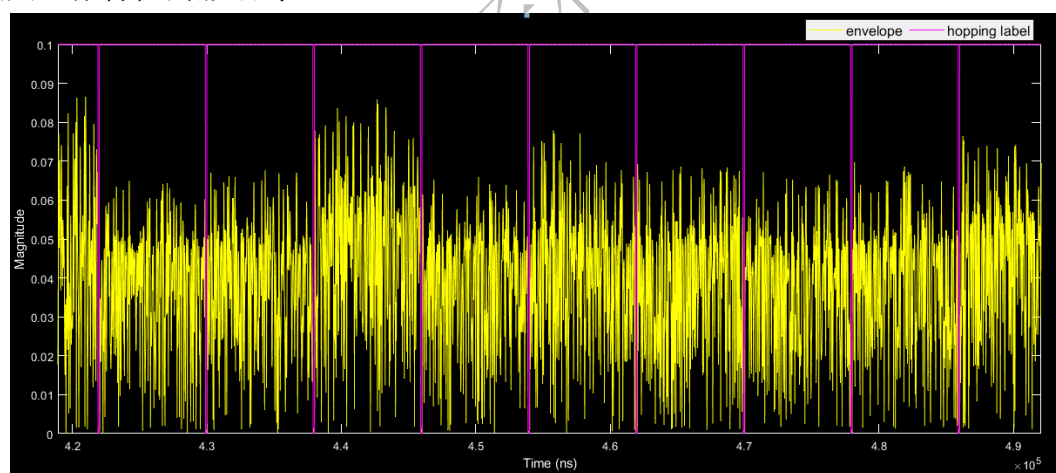


图 34 采样信号

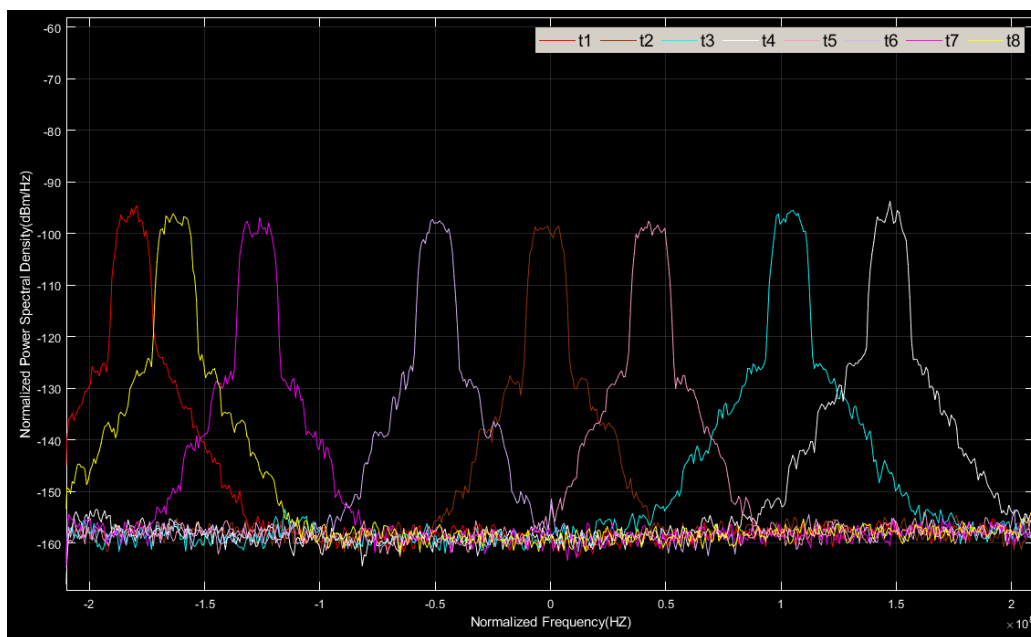


图 35 跳频信号频谱图

5.5 数字双输入发射机实验

5.5.1 实验背景

随着用户对于通信速率需求的不断提高，信号调制复杂度也在不断的提高，射频功放作为发射机系统功率消耗较大的模组，在面对越来越高的峰均比和越来越大的带宽时，为了保持输出功率和效率，衍生出了 Doherty、Outphasing、ET、LMBA 等不同的发射机架构。

然而随着通信需求进一步增加，不同频段的需求也不断涌现。最简单的做法当然是针对不同需求均单独设计一款发射机分别投入使用，但成本也同样翻了几倍。随着降本增效的理念出现，一款发射机能同时用在不同场景下的需求被提出。带宽的成倍增长与峰均比的不断增加，使得上述的发射机架构也日渐式微。为了满足这一需求，双输入发射机系统在工作带宽、能量转换效率以及数字兼容性等方面展现出了明显的优势。

传统单输入功放仅靠功分、时延、合成的方式进行输出，但链路对于频率的响应是不同的，同时两路功放本身的非线性特性也会有所区别，采用数字双输入发射机架构，可以采用分离函数对两路的幅频特性分别进行适配调整，图 36 展示了一种双输入发射机架构。

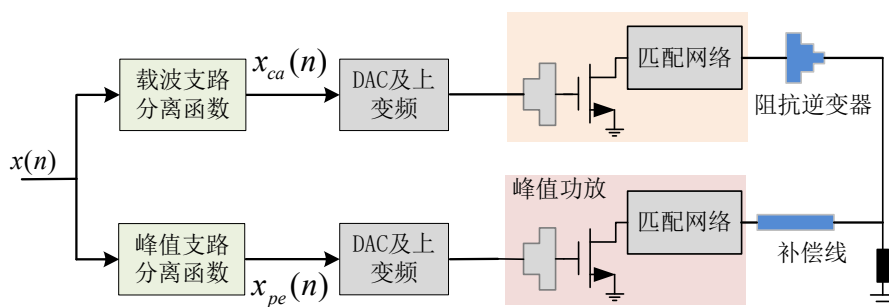


图 36 双输入发射机架构

HTR2050N306 具有两条独立收发通道，通道之间共参考，可以进行数字双输入发射机的实验。双输入架构能为功放设计带来更高的设计维度，能改善功放功率、效率、线性度等指标。图 37 展示了数字双输入发射机实验连接框图，其中功放为双输入 Doherty 功放。

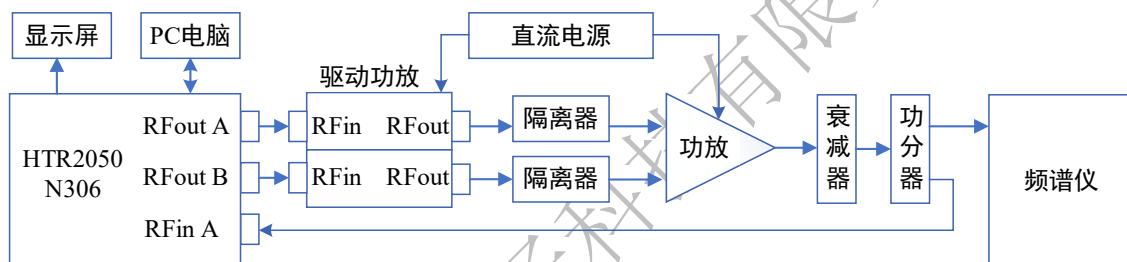


图 37 数字双输入发射机实验连接框图

将 HTR2050N306 设备按图示连接好后，通过两个功率输出端口对双输入功放进行扫描，得到功放的非线性特征；基于扫描后的特征结果设计基带分离函数并导入设备中；将待测信号通过基带分离函数分别由 RFout A/B 两通道输出；调整两个通道的功率和相位，最终得到频谱输出。

5.5.2 结果展示

工作频点选择为 3.5 GHz，加载 30 MHz 64-QAM 宽带调制信号，得到数字双输入非线性特征，如图 38 所示。此时 ACPR 为 -32.8 dBc/-37.3 dBc；NMSE 为 -27.1 dB；EVM 为 3.1%。

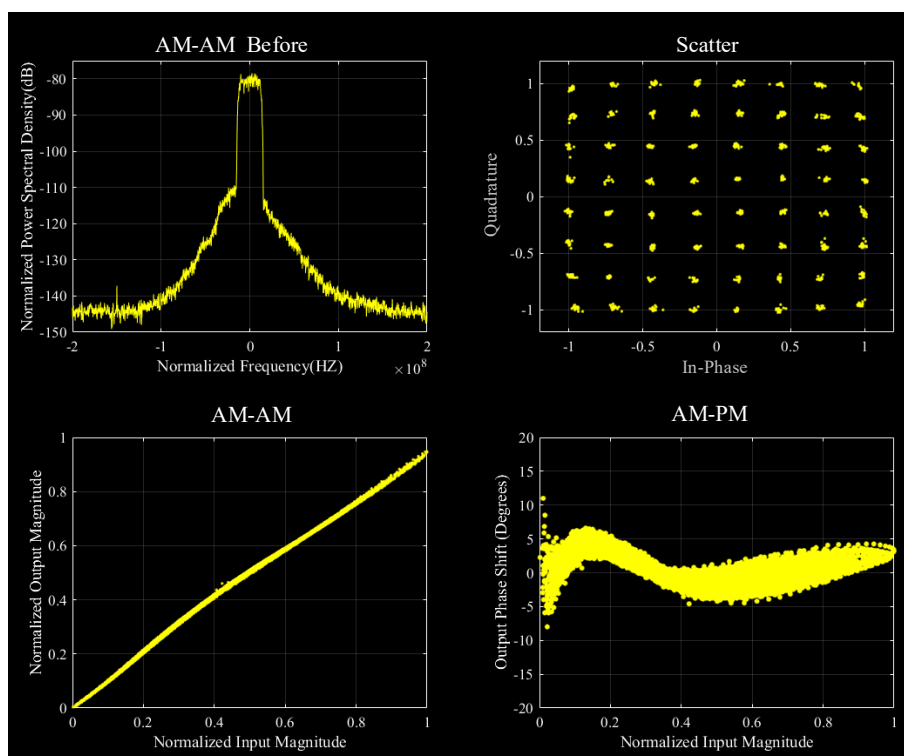


图 38 数字双输入非线性特征测试

5.6 双带并发实验

5.6.1 实验背景

通信频段一般有严格的频谱划分，不同的通信制式一般工作在不同的频段，而现代通信系统往往需要多频带同时工作。一种简单且有效的解决方案是采用多个并联的单带发射机，如图 39 所示，该方案实现简单且性能优异，但缺点也非常明显，其硬件开销将是普通单带发射机的 N 倍（ N 为通带数量）。而在实际的通信系统中，考虑到体积、装配和散热等因素， N 倍的硬件开销将会带来大于 N 倍的实现成本。

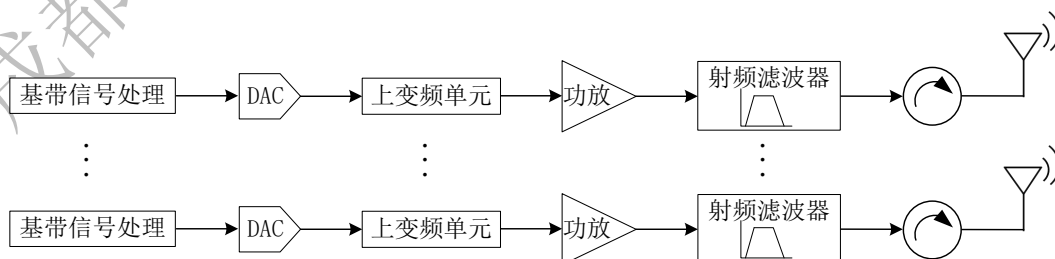


图 39 采用多路并联的多带并发发射机结构

随着芯片技术的发展，基带信号处理单元、DAC 单元和变频单元都能在各自的芯片内同时集成多路。对体积、装配、散热和硬件开销来说并不会造成太大的

影响。而随着多带功放，多带滤波器和多带天线设计技术的进步，一种基于以上多带器件的多带并发发射机结构开始得到广泛使用。该类发射机将不同的基带信号转换到对应频段后进行功率合成，然后将合成的信号通过一条功率放大支路后进行发射，其基本结构如图 40 所示。

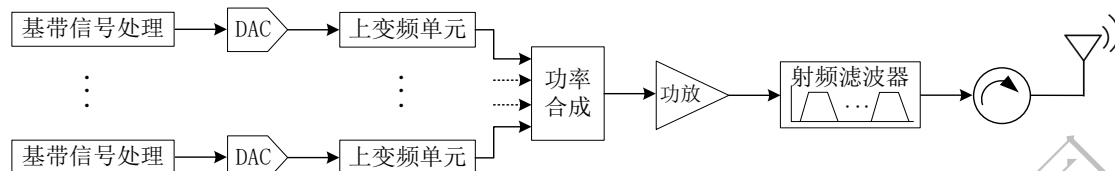


图 40 采用多带功放、多带滤波器和多带天线的多带并发发射机结构

为了能针对双带并发通信系统进行验证，HTR2050N306 具有两条独立收发通道，可以进行任意间隔带宽的双带并发实验，图 41 展示了双带并发激励下的功放测试实验。

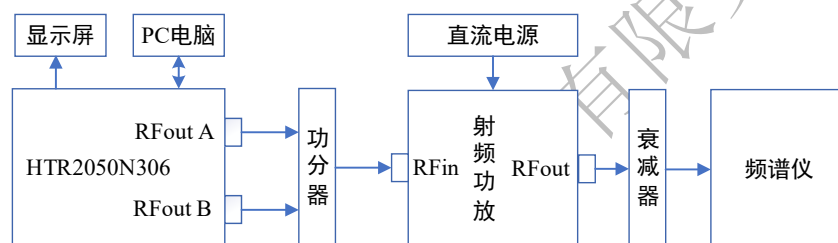


图 41 双带并发实验连接图

5.6.2 结果展示

分别在 2.1 GHz 和 3.5 GHz 处加载了 80 MHz 宽带信号，频谱仪扫描结果如图 42 所示。

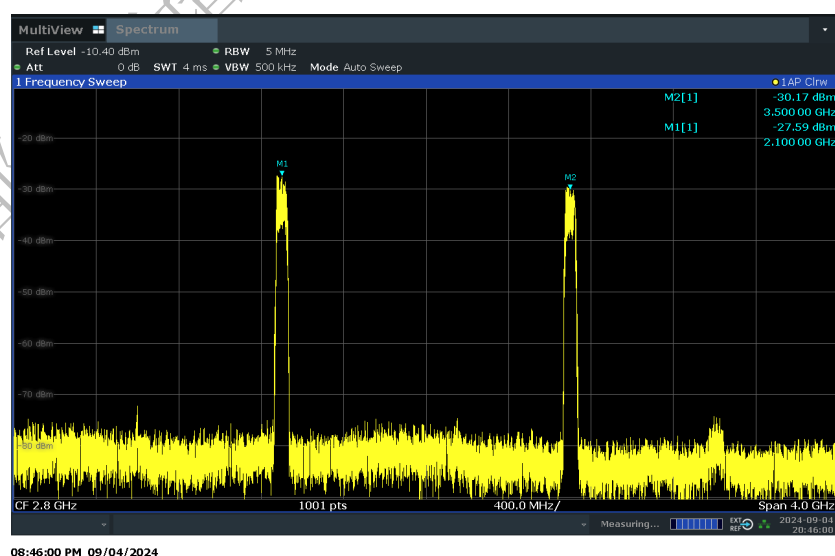


图 42 双带并发频谱扫描测试

5.7 变频模组宽带矢量特征测试

随着通信速率的不断提高，变频模组的瞬时带宽在不断扩宽，变频模组也会面临着新的问题与挑战。窄带应用时器件的响应波动较小，信号带宽变的越宽时，整个变频链路引入的幅度与相位波动则越明显。对变频模组进行宽带矢量的特征分析相对复杂，目前往往采用单音扫描的测试方式，这对于整个变频模块的宽带响应测量是缺失的。

本案例中将采用 HTR2050N306 设备对变频模组进行宽带矢量特征测试。待测件为 2 GHz 至 6 GHz 的收发模组，瞬时带宽 320 MHz，中频频率为 1.8 GHz，分别测试上变频和下变频的宽带矢量特征。

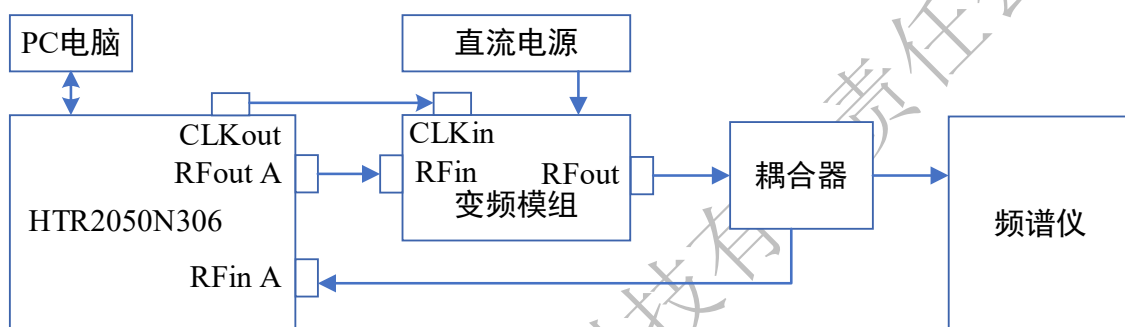


图 43 变频实验连接图

5.7.1 实验方法

本案例中的代码基于 Matlab API 进行控制，采用 320 MHz 64-QAM 信号进行测试；分别测试该模块上下变频工作在 5.8 GHz 时的宽带性能。

测试步骤如下：

步骤 1：设定发射和接收的通道为 A 路；调用**发射频率设置**函数设置频率为 1.8 GHz(上变频)/5.8 GHz(下变频)；调用**发射信号加载**函数下载 320 MHz 64-QAM 信号；调用**发射功率设置**函数设置输出功率为-10 dBm；调用**发射开关设置**函数将通道 A 设置开启。

步骤 2：设置上/下变频模组的频率为 5.8 GHz，输出功率为-10 dBm 左右。调用**接收衰减设置**调整接收衰减使得 RX1 IF 余量为 2-5 dB 之间。

步骤 3：调用**接收平均采样**函数，接收频率为 5.8 GHz（上变频）/1.8 GHz（下变频），得到采样信号；计算得到 ACPR、NMSE 和 EVM 等指标；

5.7.2 结果展示

图 44 展示了上变频工作在中心频点 5.8 GHz，带宽 320 MHz 64-QAM 信号测试下的矢量特征。ACPR 为-48 dBc，NMSE 为-23.4 dB，EVM 为 2.40%。

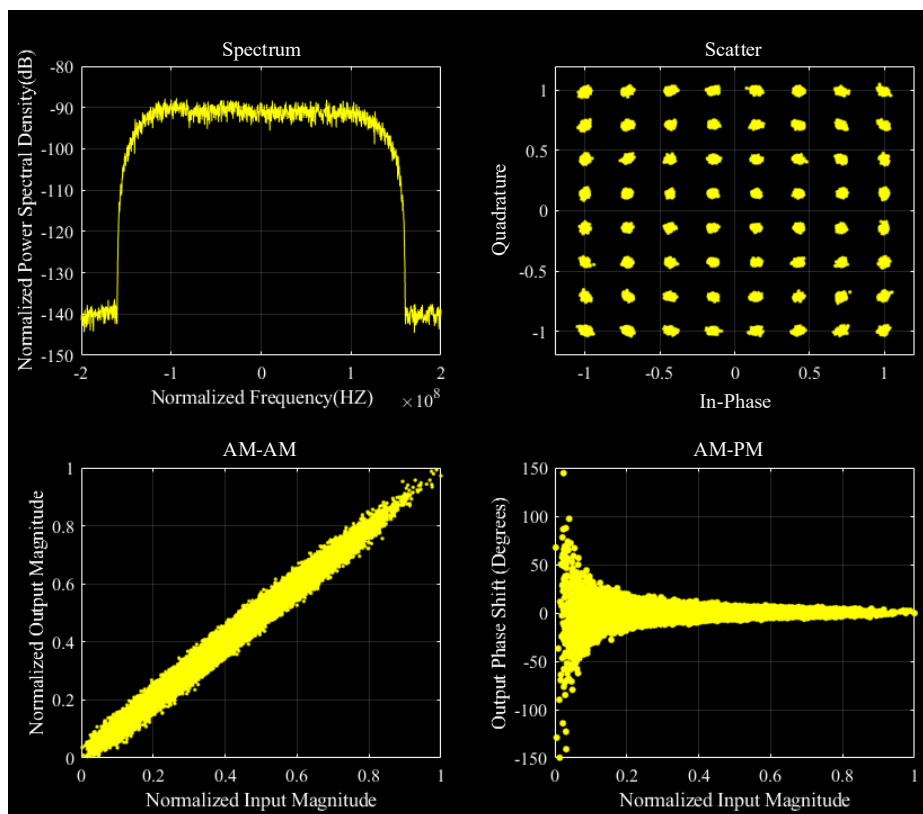


图 44 上变频 320 MHz 宽带矢量特征测试

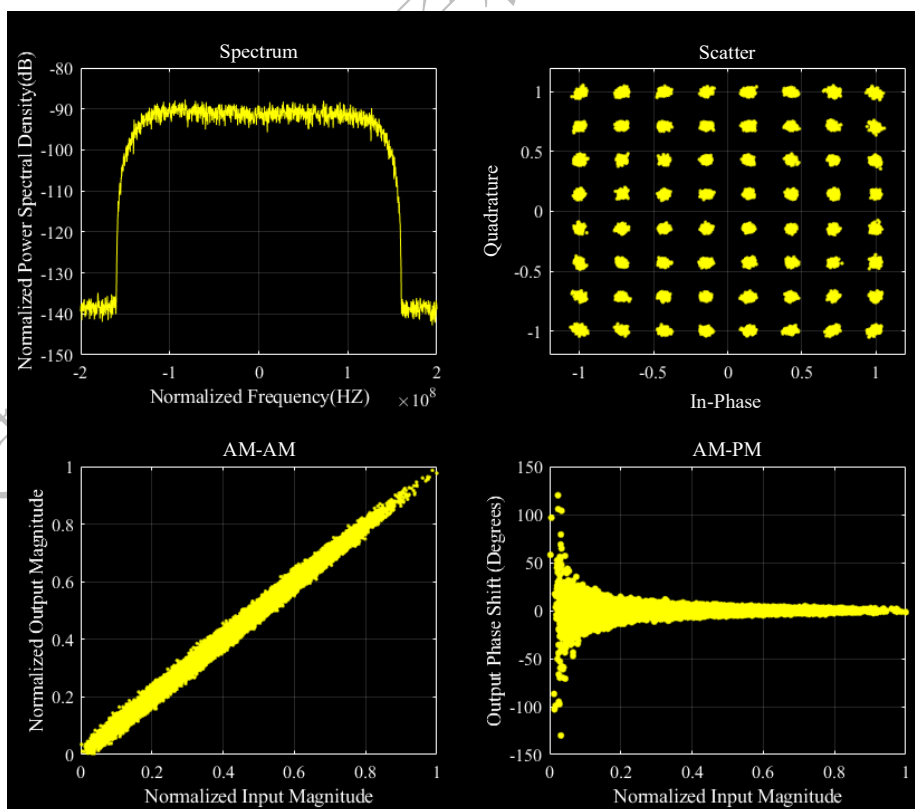


图 45 下变频 320 MHz 宽带矢量特征测试

图 45 展示了下变频工作在中心频点 5.8 GHz，带宽 320 MHz 64-QAM 信号测试下的矢量特征。ACPR 为-49 dBc，NMSE 为-26.2 dB，EVM 为 2.78%。

6 联系支持

欢迎各位专家同仁与我们一同探讨宽带矢量收发器设计技术；矢量信号激励评估射频系统性能的方法和意义；射频算法提升射频系统性能的方法与价值；高性能功率放大器设计方法。

联系方式：

彭 俊	总经理	成都市安谱力电子科技有限责任公司
	博 士	电子科技大学 · 电子科学与工程学院
	15196612731	junpeng@uestc.edu.cn 028-61833783
李 川	技术总监	成都市安谱力电子科技有限责任公司
	博 士	电子科技大学 · 电子科学与工程学院
	18782050744	chuanli@uestc.edu.cn



微信搜一搜



安谱力科技

7 公司介绍

成都市安谱力电子科技有限责任公司成立于 2021 年，核心成员来自于电子科技大学电子科学与工程学院数字射频混合集成电路团队，团队自 2005 年开始研究宽带射频收发机设计技术，承担并完成了多项国家级研发项目和横向合作项目，提出了多项创新性技术，积累了丰富的设计经验。

公司以大功率高线性宽带矢量收发器的研发和设计为主要业务，通过射频算法与射频电路设计技术的交叉融合，打造具有一流水准的矢量信号收发模组和系统。