

WLAN 综合测试平台

1. WLAN 802.11a/b/g/n/ac/ax

随着移动通信技术的快速发展，作为其中重要的一员，WiFi 变得越来越重要。几乎所有智能手机、平板电脑和笔记本电脑都需要支持 WiFi 连接，毫无疑问，WiFi 是当今使用最广的一种无线通信技术。然而，在过去很多年，由于市场监管和测试成本的种种原因，很多产品的 WiFi 部分被作为附属网络功能，没有被测试或只进行简单的测试。为了在市场竞争处于更有利的位置，移动终端生产厂家越来越注重产品质量和用户体验，在实验室引入 WiFi 产品的测试环境，如射频测试环境、OTA 测试环境以及应用测试环境，生产则只对每个产品的射频性能进行测试。

1.1 信令测试

信令是通讯设备之间的语言，它们按照既定的通讯协议工作，将应用信息安全、可靠、高效地传送到目的地。这些信息在通信网络中叫做信令。搜索网络、接入网络以及上网冲浪，这些都是终端的基本功能。在这些过程中，WiFi 终端之间需要大量的信令消息传递。测试仪表作为 AP（路由器）或 Station（终端）模拟器，完整的模拟了这些信令交互过程，并在这些过程中，测量各项射频指标，根据测试标准门限，就可以判断该被测件是否能正常工作及其性能优劣。我们称这种测试方法为信令测试。所以，信令测试不仅可以对终端的射频指标进行评估，也可以判断被测件常用的通讯协议是否正确。



图 1 信令测试环境

信令测试是在被测件与测试仪表之间互动的一种测试方案，测试仪表可以根据测试要求，控制被测件进行工作。如图 1 所示，被测件与仪表之间通过射频连接：1、通过射频线缆直接连接，可测试射频的相关指标；2、通过天线进行耦合连接，测试 OTA 下的终端性能。

1.2 非信令测试

在现阶段，WiFi 产品的射频测试可以采取一种非信令的测试方法，即一台测试仪表连接一个被测件，通过一台电脑，分别控制测试仪表和被测件，按照规定的测试序列，自动测试 WiFi 产品的射频性能。图 2 为一个典型的非信令测试环境，图中测试仪表为罗德与施瓦茨公司的综合测试仪 CMW500，被测件为一个手机，电脑通过控制总线分别控制 CMW500 和手机。



图 2 非信令测试环境

非信令测试方案中，被测件和仪表接收来自于主控 PC 的指令：PC 机首先通过芯片公司提供的软件控制被测件产生需要测试的信号，然后操作仪表进行测试。

与信令测试相比，非信令测试忽略了信令交互的过程，仅仅对射频性能进行测试，并且需要测试人员熟悉芯片控制软件。

2. WLAN 11ax 简介

本节介绍一些特定于 11ax 信号的术语，有助于理解测量结果。

IEEE 802.11ax 又称为高效率无线标准（High-Efficiency Wireless, HEW）。

11ax 可以支持 2.4GHz 和 5GHz 频段，而 11ac 只能运行在 5GHz 频段，在数据速率和信道宽度上与 11ac 相似，但却能搭配 1024-QAM 提供新的调变和编码组合（MCS 10 和 11），

11ax 还能提供 4 倍的 OFDM FFT，更窄的子载波间距（密度为 4 倍）及 4 倍的符号时间，以改善多路径衰减环境与室外的稳固性和性能，可将火车站、机场等用户密集环境中的每位用户的平均传输率提升 4 倍以上，即在高密环境下为更多用户提供一致且稳定的数据流（平均传输率），将有效减少网络拥塞、大幅提升无线速度与覆盖范围。

不仅如此，通过 MU-MIMO 和 OFDMA 技术，还可进行指定的下链和上链多用户作业。

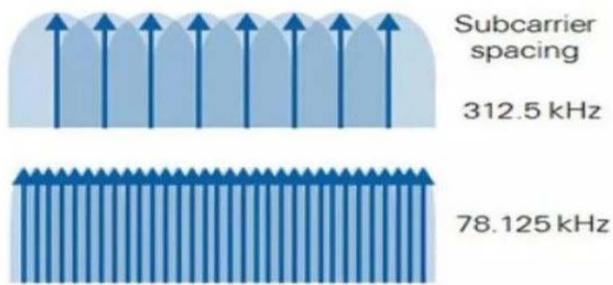


图 3 11ac & 11ax Subcarrier 结构

Standard	802.11ax
Frequency band	2.4 GHz, 5 GHz
Channel width	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, or 160 MHz
Transmission scheme	OFDM, OFDMA
Burst type	High efficiency single user PSDU (HE SU PPDU), one or more PSDUs to one or more users (HE MU PPDU), HE trigger-based single user PSDU (HE TB PPDU)
Guard interval	0.8 μ s, 1.6 μ s, or 3.2 μ s
MU-MIMO	Downlink and uplink
Modulation	Modulation type, coding rate BPSK, 1/2, BPSK, 1/2 DCM QPSK, 1/2, QPSK, 1/2 DCM QPSK, 3/4 16-QAM, 1/2, 16-QAM, 1/2 DCM 16-QAM, 3/4, 16-QAM, 3/4 DCM 64-QAM, 2/3 64-QAM, 3/4 64-QAM, 5/6 256-QAM, 3/4 256-QAM, 5/6 1024-QAM, 3/4 1024-QAM, 5/6
Payload length	16 to 1024 symbols
Subcarrier spacing	78.125 kHz
Symbol time	12.8 μ s

图 4 11ax 频段简介

WLAN 802.11ax: Multi-User MIMO (MU-MIMO)

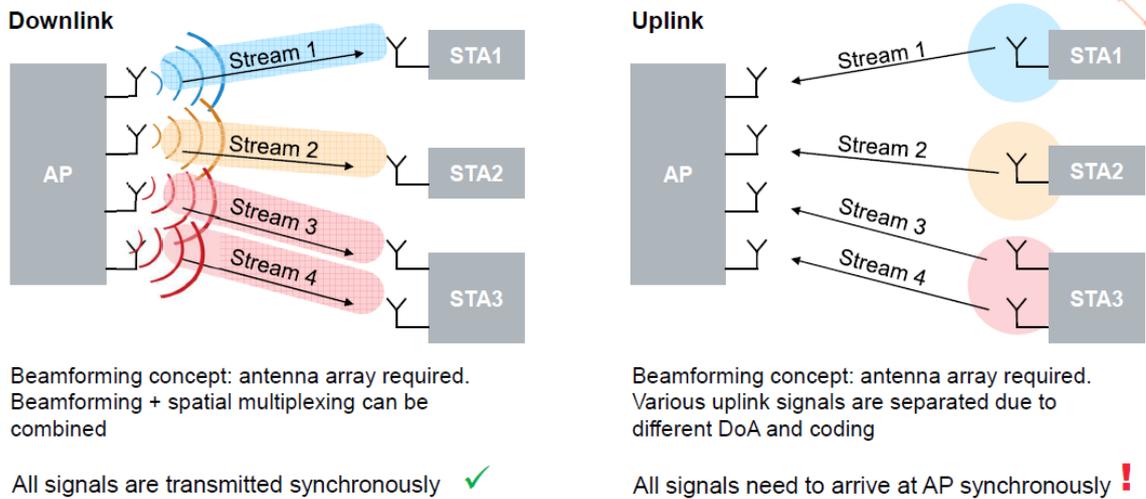


图 5 11ax MU-MIMO

2.1 11ax 信令测试

CMW500 是业界唯一支持 11ax 的综合测试仪。信令测试的优点在于：无论实现 11ax 通信的芯片来自于任何类型、任何厂家，只要符合规范中射频要求、协议流程要求，都可以完成接入及测试。非常有利于研发、验证、比对工作。

CMW500 支持：

- ✓ AccessPoint Emulation for Test of 11ax-Stations
- ✓ AccessNode Emulation for Test of 11ax-AP
- ✓ Up to 160 MHz bandwidth
- ✓ SingleUser DL/UL HE-SU
- ✓ MultiUser Downlink HE-MU
- ✓ Uplink HE-TB
- ✓ Power Control by Trigger Frame
- ✓ Support of e2e/Application/Performance Measurements
- ✓ Message Analysis by CMWmars

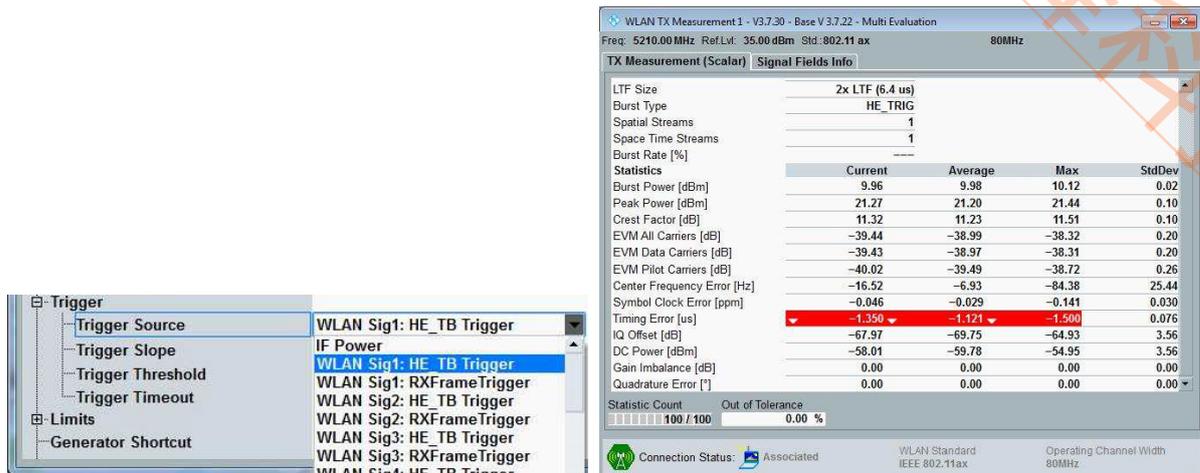


图 6 CMW500 11ax 信令测试

CMW500、CMW270 支持信令的选件如图：

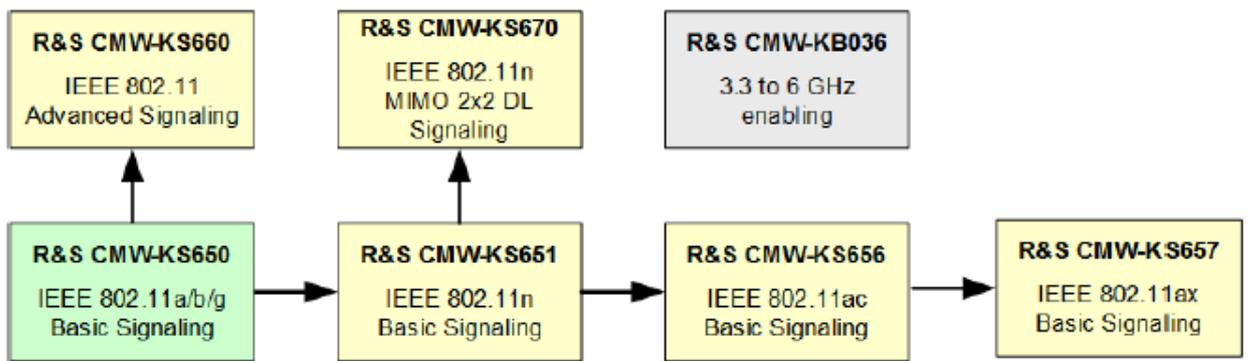


图 7 CMW500 信令测试选件

2.2 11ax 非信令测试

非信令测试区别与传统信令测试，主要用于工厂批量生产，降低生产成本，主要目的是检测产品 RF 电路的射频性能，也有研发在硬件调试阶段用来调试产品性能。

对于非信令测试，AP 与终端之间没有信令的控制过程，需要分别配置各自的测试选项，保证测试条件下才能获取到准确测试结果。



测试目的主要是检测被测件（DUT）的发射（TX）和接收（RX）射频链路

TX 测试： DUT 发射指定信号，CMW 用来检波，解调出对应射频指标

RX 测试： PER 测试是 CMW 用来发射指定数量和类型的 package，DUT 来检测收到好包的数量，来计算 $package\ error\ rate = (total\ package - good\ package) / total\ package$;

RSSI 测试也是 CMW 来发射指定类型的连续 package，DUT 来扫描信号的大小，读取并记录 RSSI，来判断 RX 链路侦测信号的准确性。

2.2.1 CMW 非信令测试选件要求

- ✓ 11ax 测量只支持 CMW TRX160 仪表，即支持 CMW100 V06，以及 CMW500 MUA 仪表。
- ✓ 非信令 TX 测试，Measurement Required options:
- ✓ "802.11n" requires R&S CMW-KM651
- ✓ "802.11ac" requires R&S CMW-KM651 and R&S CMW-KM656
- ✓ "802.11ax" (R&S CMW with TRX160 only) requires R&S CMW-KM651, R&S CMW-KM656, and R&S CMW-KM657
- ✓ "802.11p" requires R&S CMW-KM655
- ✓ 非信令 RX 测试，Generator Required options:
- ✓ "802.11ax" (R&S CMW with TRX160) requires CMW-KW650 and KW657
或者配置对应芯片的 KV*选件；
- ✓ 如果要做 11ax MIMO 测试，需要增加配置 KM653。

Receive Mode						
Allows you to select a receive mode.						
The available receive modes depend on the selected IEEE 802.11 standard, as summarized in the following table:						
Receive mode	IEEE 802.11 standard					
	b/g	a/g	n	ac	ax	p
SISO	✓	✓	✓	✓	✓ ²	✓
Composite MIMO (R&S CMW-KM652)	-	-	✓	✓ ¹	-	-
Switched MIMO (R&S CMW-KM653)	-	-	✓	✓ ¹	✓ ^{1,2}	-
¹ Available on R&S CMW100 only						
² Available on R&S CMW with TRX160 only						

图 8 11ax Switch MIMO 测试选件

2.2.2 11ax 非信令 TX 测试

Step1: 非信令 TX 测试，首先要打开芯片控制软件，通过 COM 口或网络 LAN 口连接 DUT，控制发射指定类型的信号，如下是使用博通的 accessMtool 控制 TX 发射信号的操作，等待 log 显示区提示已经成功打开 TX 信号，

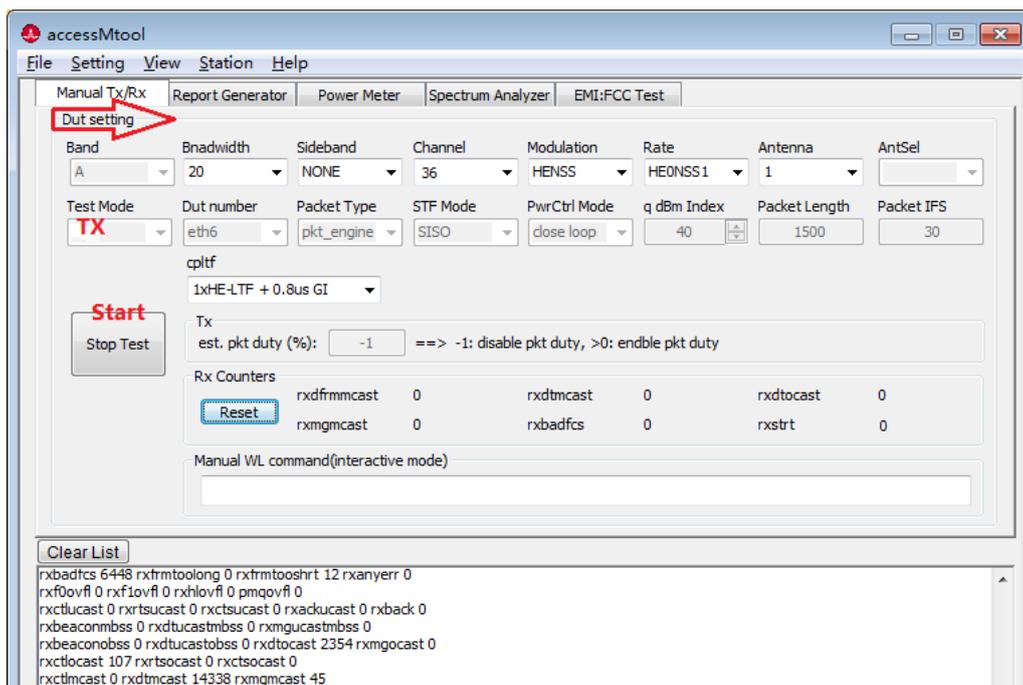


图 9 BCM 控制 DUT 发射 TX 信号

Step2: 开始设置仪表，打开仪表界面，选择 WLAM Multi-Evaluation，弹出 WLAN TX Measurement 界面；

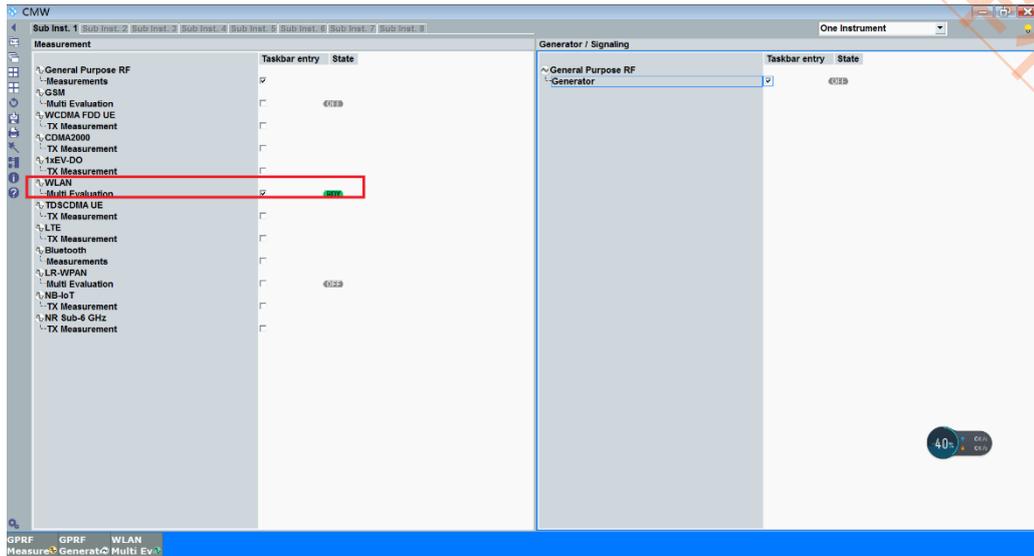


图 10 CMW Multi-windows 主界面

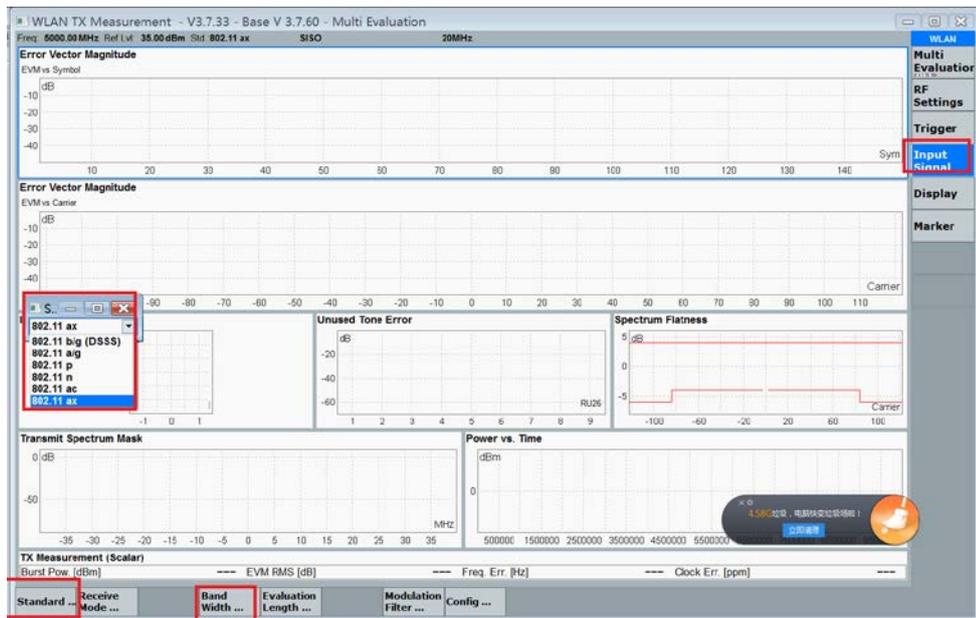


图 11 CMW WLAN TX Measurement 界面

Step3: 进行测试配置，所有的测试配置可以打开主界面右下角的 Config 按钮

- ✓ 配置: Standard, bandwidth, center frequency
- ✓ 配置射频口, 期望功率, 线损: Routing, expected normal power, attenuation
- ✓ 配置 Trigger: Source 选择 If trigger, If Min GAP 配置成 5us
- ✓ 配置 Measurement 测试项目, 打开需要的测试 item
- ✓ 配置 Measurement control

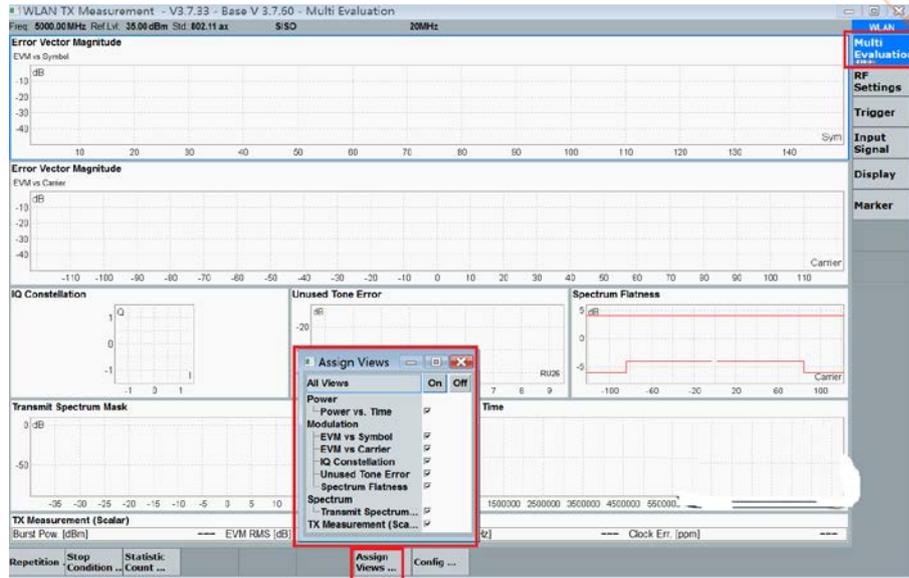


图 12 Measurement 配置需要的测试项目

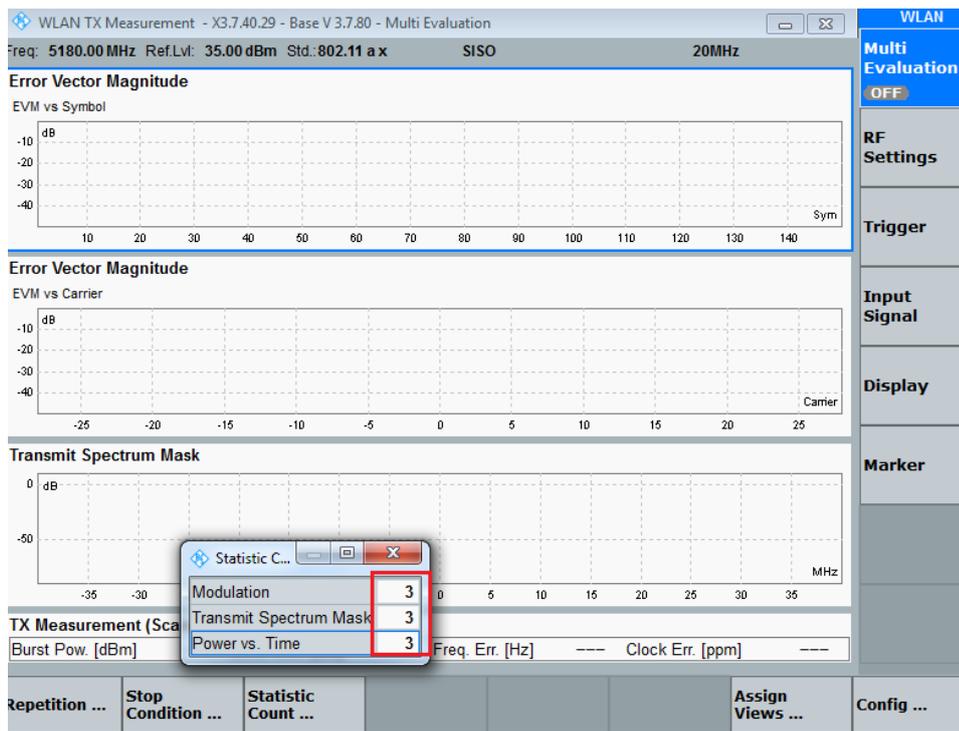


图 13 配置每次采集的 TX burst 数量

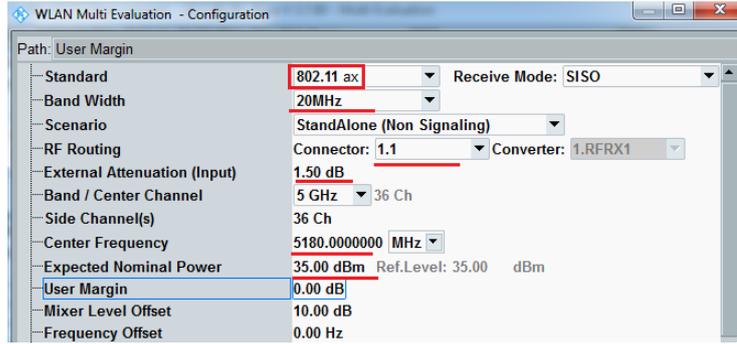


图 14 配置 Input signal 参数

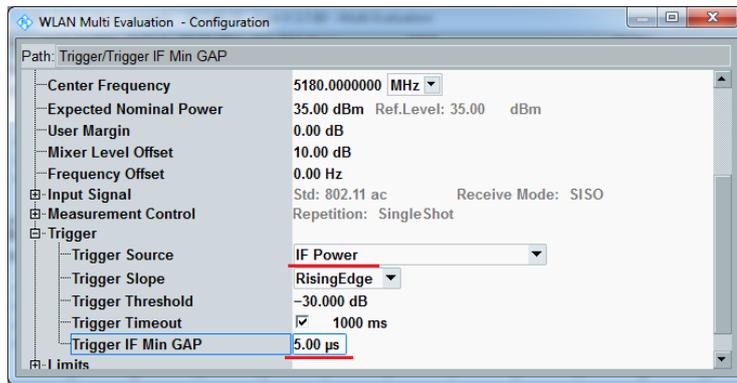


图 15 配置 Trigger 触发参数

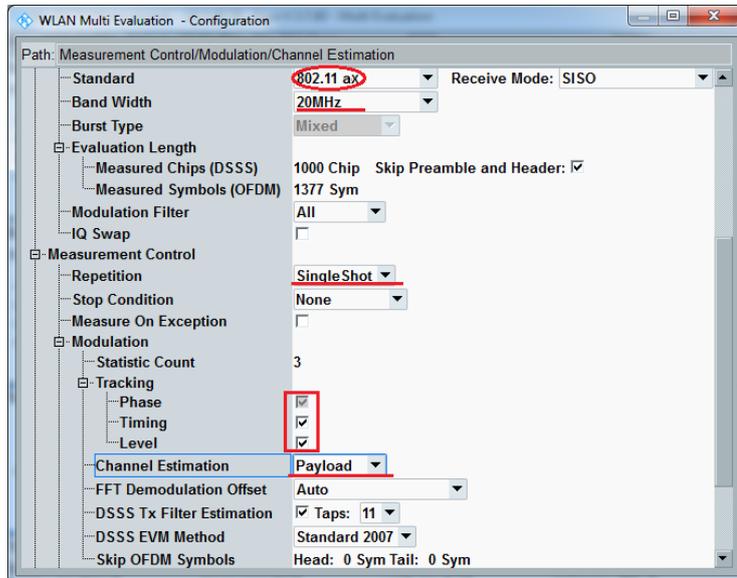


图 16 配置 Measurement Modulation 参数

Step4: 右键界面右上角的 Muti Evaluation 按钮，选择 ON 打开测试

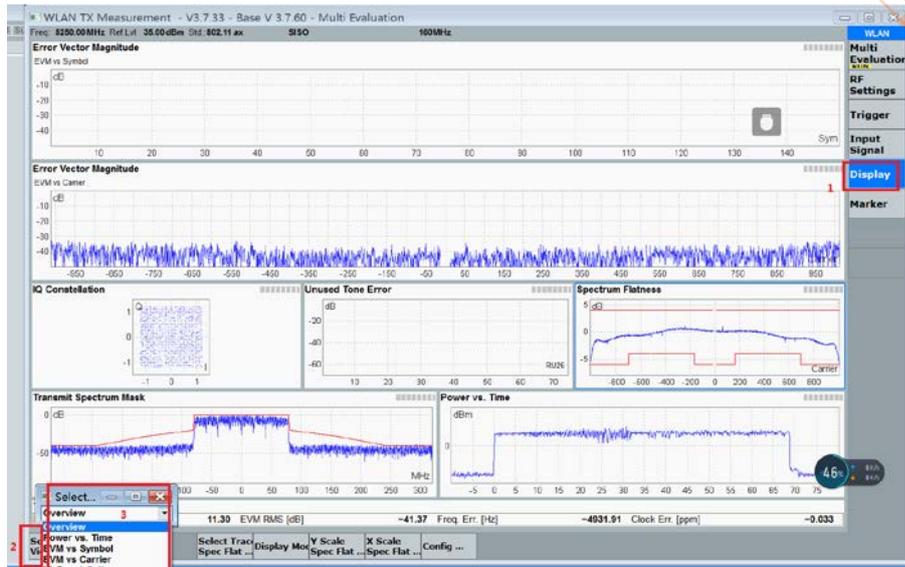


图 17 Measurement Result Overview 界面

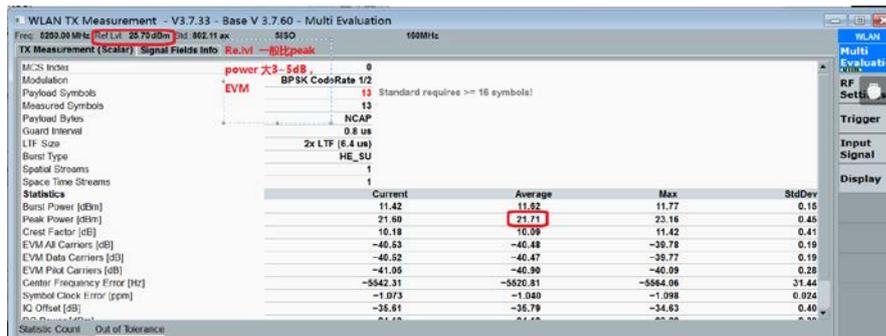


图 18 Measurement Result TX Measurement (Scalar) 界面

2.2.3 11ax 非信令 RX 测试

RX 测试就是仪表在 ARB 模式下发射指定大小和类型的波形文件，DUT 来检波，RX 测试项目主要两项：

2.2.3.1 PER 测试

- ✓ DUT 设置频点，打开接收，reset 收包数清零
- ✓ 配置频率，ARB 波形文件，选择 Single Mode 发射 1000 packages
- ✓ DUT 检测 good packages 数量，计算 PER

2.2.3.2 RSSI 接受电平测试

- ✓ 需要看看芯片是否支持此测试项
- ✓ DUT 设置频点，打开接收
- ✓ 配置频率，ARB 波形文件，选择 continue Mode 发射

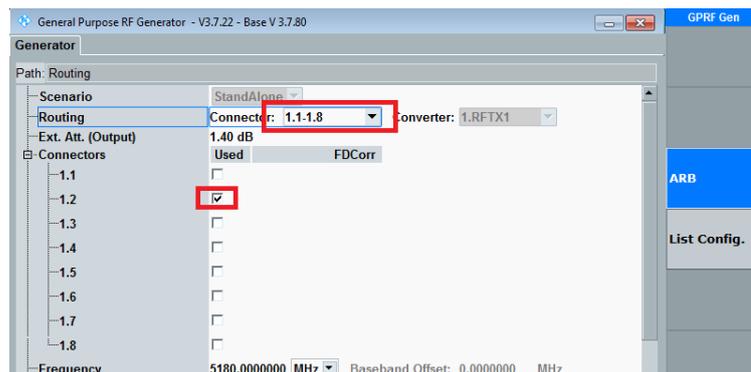


图 19 配置 Generator 射频发射端口

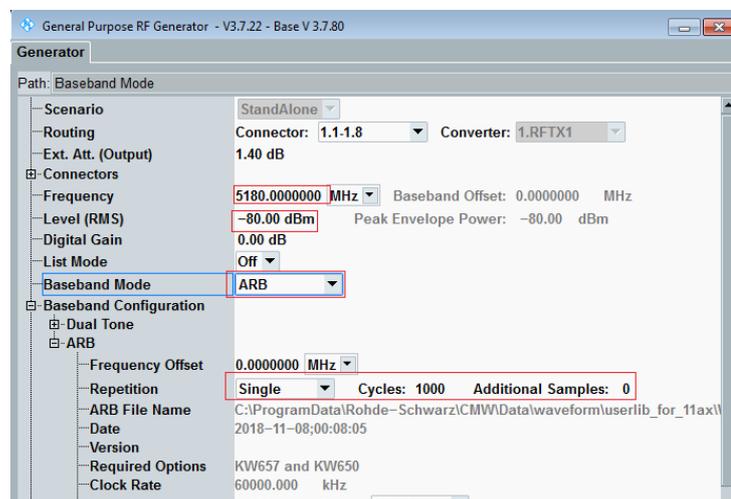


图 20 配置 ARB 信号参数

✓ DUT 检测接收电平结果

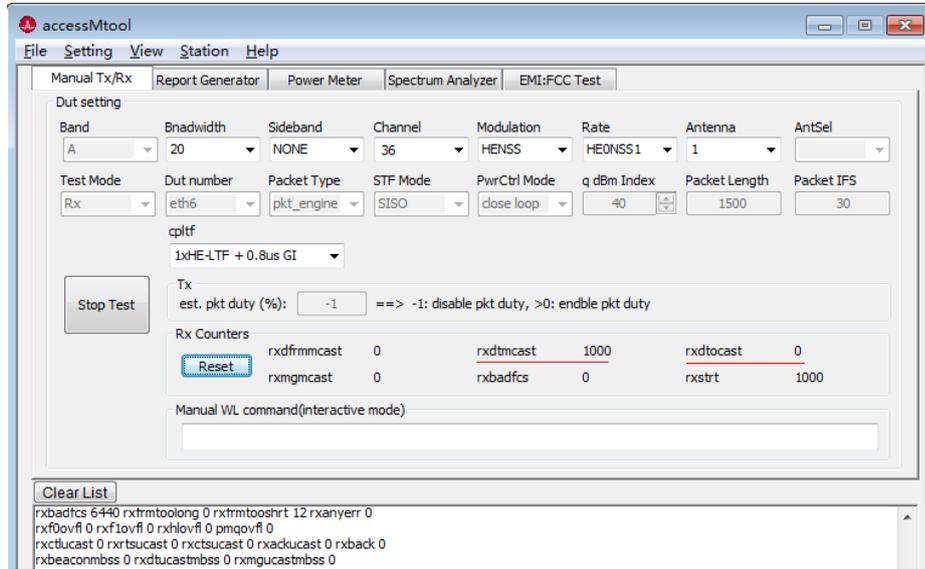


图 21 BCM Tool 检测接收信号

2.2.4 11ax 测试的代码实现

如下是一个代码实例，配置仪表测试项，并取测试结果，帮助手册可以在仪表或安装 firmware 的电脑上找到，路劲如下：

C:\Program Files\Rohde-Schwarz\CMW\3.7\Docu （3.7 为版本信息，可能有差异）

2.2.4.1 配置 11ax 测试选项

```

*****

// Initial system-reset *****

*RST; *OPC?

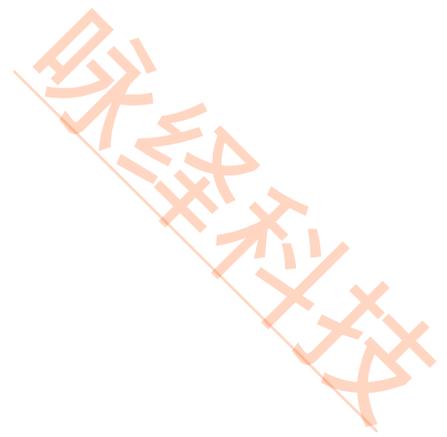
*CLS; *OPC?

*****

// Define signal routing, perform RF and analyzer settings for a WLAN

*****

```



```
ROUTE:WLAN:MEAS:SCENario:SALone RA1, RX1
CONFigure:WLAN:MEAS:RFSettings:EATTenuation 1.4
CONFigure:WLAN:MEAS:RFSettings:FREQuency:BAND B5Ghz
CONFigure:WLAN:MEAS:RFSettings:FREQuency 5180E+6
CONFigure:WLAN:MEAS:RFSettings:ENPower 35
CONFigure:WLAN:MEAS:RFSettings:UMARgin 0
*****

// Define input signal settings for IEEE 802.11ax:
// Select standard, receive mode, burst type, bandwidth and I/Q swap.
*****

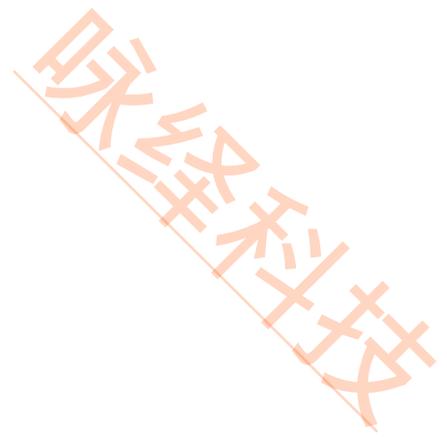
CONFigure:WLAN:MEAS:RFSettings:UMARgin 0
CONFigure:WLAN:MEAS:ISIGnal:STANdard HEOFdm
CONFigure:WLAN:MEAS:ISIGnal:RMODE SISO
CONFigure:WLAN:MEAS:ISIGnal:BWIDth BW20
CONFigure:WLAN:MEAS:MEValuation:SCOunt:MODulation 3
CONFigure:WLAN:MEAS:MEValuation:SCOunt:PVTime 3
CONFigure:WLAN:MEAS:MEValuation:SCOunt:TSMask 3
CONFigure:WLAN:MEAS:MEValuation:COMPensation:TRACking:PHASe ON
CONFigure:WLAN:MEAS:MEValuation:COMPensation:TRACking:TIMing ON
CONFigure:WLAN:MEAS:MEValuation:COMPensation:TRACking:LEVeI ON
CONFigure:WLAN:MEAS:MEValuation:COMPensation:CESTimation PAYL
*****

// Set trigger source, timeout, trigger level, trigger gap.
*****

TRIGger:WLAN:MEAS:MEValuation:SOURce 'IF Power'
TRIGger:WLAN:MEAS:MEValuation:TOUT 1
TRIGger:WLAN:MEAS:MEValuation:THReshold -25
TRIGger:WLAN:MEAS:MEValuation:MGAP 0.00001
```

2.2.4.2 获取 11ax 测试结果

```
*****
```



```
// After configuring the measurement for 802.11ax,
// Start single-shot measurement and return first results.
*****

CONFigure:WLAN:MEAS:MEValuation:REPetition SINGleshot
INIT:WLAN:MEAS:MEValuation
*****

// Query Modulation and spectrum *****
FETCh:WLAN:MEAS:MEValuation:TSMask:AVERage?
FETCh:WLAN:MEAS:MEValuation:MODulation:AVERage?
```

本节介绍了 CMW100 做 IEEE 802.11ax 测试的非信令方案，通过 11ax 芯片的控制工具与 CMW 的交互控制，完成对 11ax 产品的接收和发射功能测试，CMW100 是一台多端口仪表，既可用于研发手动非信令测试，也可以用于工厂的生产测试，8 个 TRX 双工端口，支持一对多，节省工厂仪表投入。

3. 小结

随着无线通信技术的高速发展，使得无线产品竞争越来越激烈。为了生产性能更好的产品，围绕产品的测试将越来越丰富。要进行更完善的测试，需要耗费更多的测试时间，因而，我们有必要在各个阶段选择合适的测试方案，以最低的测试成本实现产品性能最优化。罗德与施瓦茨公司的 CMW270/500/CMW100 支持 WLAN 802.11a/b/g/n/ac/ax 等各种标准，支持信令和非信令测试，助力 WLAN 芯片研发、终端研发和快速生产测试等各个阶段。

4. 订购信息

综测仪 CMW270 或 CMW500		
描述	选件名	货号
Wideband Radio Communication Tester Base unit with following accessories: power cord, operating manual (quick start guide),	CMW270	1201.0002K75
Wideband Radio Communication Tester Base unit with following accessories: power cord, operating manual (quick start guide),	CMW500	1201.0002K50

WLAN IEEE 802.11a/b/g basic signaling (SL)	CMW-KS650	1207.5858.02
WLAN IEEE 802.11n, basic signaling (SL)	CMW-KS651	1207.5706.02
WLAN 802.11 ac, basic signaling (SL)	CMW-KS656	1209.2210.02
WLAN IEEE 802.11ax AP EMULATION (SL)	CMW-KS657	1211.0828.02
WLAN IEEE 802.11ax STA Emulation (SL)	CMW-KS658	1211.4469.02
WLAN IEEE 802.11a/b/g advanced signaling(SL)	CMW-KS660	1207.5906.02
WLAN IEEE 802.11a/b/g, TX measurement (SL)	CMW-KM650	1203.1658.02
WLAN IEEE 802.11n SISO, TX measurement(SL)	CMW-KM651	1203.9159.02
WLAN IEEE 802.11 MIMO, composite TX measurement (SL)	CMW-KM652	1203.9207.02
WLAN IEEE 802.11, True MIMO Tx measurement (SL)	CMW-KM654	1211.1447.02
WLAN IEEE 802.11p, TX measurement (SL)	CMW-KM655	1208.7702.02
WLAN IEEE 802.11ac SISO, Tx measurement(SL)	CMW-KM656	1208.6106.02
WLAN IEEE 802.11ax SISO Tx measurements(SL)	CMW-KM657	1211.0786.02
Wireless technologies, RF testing bundle (SL)	CMW-PK60	1207.6502.02
WLAN call box bundle (SL)	CMW-PK65	1208.4755.02
Communications Manufacturing Test Set	CMW100K06	1201.0002K06
R&S®CMW100, WLAN 802.11 abgn ac, TX measurements (SL)	CMW-PKM651	1210.7287.02
WLAN IEEE 802.11 MIMO, composite TX measurement (SL)	CMW-KM652	1203.9207.02
WLAN IEEE 802.11 MIMO, switched TX measurement (SL)	CMW-KM653	1207.7709.02
WLAN IEEE 802.11, True MIMO Tx measurement (SL)	CMW-KM654	1211.1447.02
WLAN IEEE 802.11p, TX measurement (SL)	CMW-KM655	1208.7702.02
WLAN IEEE 802.11ax SISO Tx measurements (SL)	CMW-KM657	1211.0786.02
IEEE 802.11abgnjp, enable WinIQSIM2 waveforms for ARB (SL)	CMW-KW650	1203.1258.02
WLAN IEEE 802.11ac, enables WinIQSIM2 waveforms for ARB (SL)	CMW-KW656	1207.9001.02
WLAN IEEE 802.11ax, enable WinIQSIM2 waveforms for ARB (SL)	CMW-KW657	1211.0805.02

表 1 CMW500 测试 WLAN 选件

5. WLAN 802.11ad

随着智能手机、电视和平板电脑等各种无线终端的大量普及，视频等高速数据交互变得更加频繁，数据吞吐量呈现了爆发式增长态势，这些需求推动着无线通信技术不断向前发展，一种可在短距离上进行超高速无线传输的标准 IEEE 802.11ad 应运而生，该技术也被称为 WiGig。

802.11ad 是近十年来对 IEEE WLAN 标准的一次革命性更新，它首次引入了 60 GHz 毫米波工作频段，而之前 802.11n 工作在 2.4GHz 或 5GHz 频段，802.11ac 工作于 5GHz 频段，而 60 GHz 频段拥有比 5GHz 频段大数十倍以上的工作带宽。

802.11ad 的技术优势体现在以下几方面：

✓ 高速率

- 11ad 标准理论最高速率可到 7 Gbps，虽然 11ac 通过使用 8x8 MIMO、256 QAM 调制以及 160 MHz 带宽也能达到相似的速率，但 11ad 仅需一个空间流、64 QAM 调制和单个信道就能实现相同速率目标。

✓ 大容量

- 毫米波的应用可以很大程度减少天线间尺寸，便于集成多个天线单元，在原有 2.4 GHz 频段天线面积上可以容纳 32 或更多的天线单元，大规模天线通过 Beamforming 技术实现高方向性通信，有效降低多个设备同时工作时的相互干扰，极大提升信道容量。

✓ 低时延

- 10us 的往返时间成为可能，几乎可比于有线通信，满足时延要求敏感的应用如虚拟现实(VR)和增强现实(AR)。

WiGig/802.11ad 技术支持广泛的应用，包括无线投影、高清视频分发、PC 无线扩展坞和无线 VR 头盔等。产业链上芯片商有像 Intel、高通和三星，终端设备典型的有 TP-Link Talon AD7200 路由器、戴尔 E7450/7470 笔记本等。

802.11ad 有着以上的优点，但 60 GHz 频段路损较大，衰减严重，决定了其无法穿墙或远距离传输，因此往往需要搭配 11n/ac 技术，组成无缝的三频 WLAN 产品。

5.1 802.11ad 技术原理

5.1.1 信道分配

802.11ad 工作于 60 GHz(57 GHz – 66 GHz)ISM 频段，该频段共定义了四个信道，每个信道带宽 2.16 GHz，但不是四个信道在世界各地都能适用，其中只有 2 号信道(60.48 GHz)全球通用，因为常被置为默认信道号。

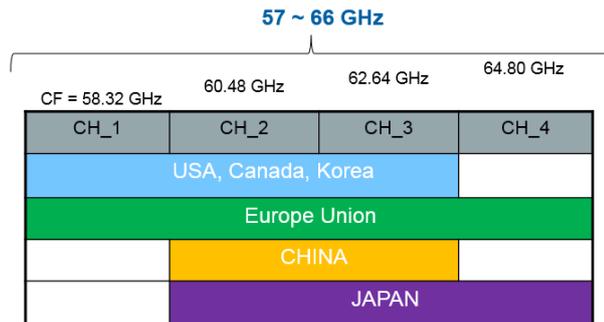


图 22 全球 WLAN 802.11ad 频率分配

5.1.2 物理层

802.11ad 共定义了四种物理层方式，以适应不同的使用环境，如低功耗单载波方式着眼于对功耗敏感的终端设备。11ad 设备不一定需要支持全部四种方式，这里只有控制物理层 (SC PHY)和常规单载波调制(SC PHY)两种是强制要求，OFDM 和低功耗 SC 是可选方式，目前市场上商业芯片几乎都不支持 OFDM 方式，因此实际上最高速率是单载波调制 SC 工作在 MCS12 时的 4.6 Gbps。

PHY	MCS	Modulation	IDEAL RAW BIT RATE
Control PHY	0	$\pi/2$ DBPSK	27.5 Mbps
Single carrier(SC) PHY	1...12	$\pi/2$ DBPSK $\pi/2$ QPSK $\pi/2$ 16-QAM	385 ~ 4620 Mbps
OFDM PHY (optional)	13...24	OFDM-SQPSK OFDM-QPSK OFDM-16QAM OFDM-64QAM	693 ~ 6756.75 Mbps
Low-Power SC PHY (optional)	25...31	$\pi/2$ DBPSK $\pi/2$ QPSK	625.6 ~ 2503 Mbps

表 2 WLAN 物理层

以上所有的物理层方式使用相同的帧结构，包括了 Preamble, Header, Data 和 TRN 四部分。

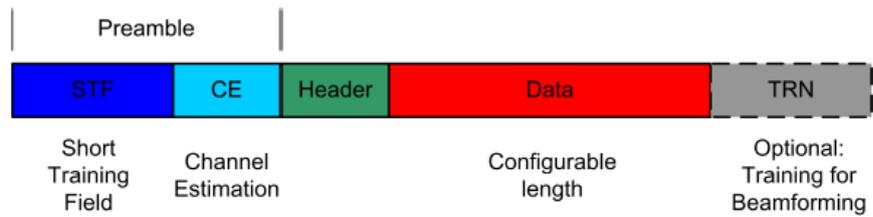


图 23 802.11ad 帧结构示意图

5.1.3 Preamble

前导包括了短训练信号和信道估计，存在于所有的物理层方式中，用于接收机识别包类型、频率误差估计，也能用于信道估计。

5.1.3.1 Header

每个物理层有不同的包头，包含发给接收设备的重要信息，例如调制编码方式，文件长度以及校验和。

5.1.3.2 Data

该部分用于传输编码调制后的真正用户数据

5.1.3.3 TRN

属于可选部分，可加入在任何包中，用于优化 Beamforming 设置

5.2 测试需求

- ✓ 频谱发射模板(Transmit Mask)
- ✓ 中心频率容差(Center Frequency Tolerance)
- ✓ 符号定时误差(Symbol clock tolerance)
- ✓ 本振泄露(Transmit Center Frequency leakage)
- ✓ 突发的上升沿和下降沿时间(Transmit Rampup and Rampdown)
- ✓ 不同 MCS 下 EVM 和灵敏度要求

5.3 研发测试方案

802.11ad 设备包括了基带 BB 芯片和射频收发 RFIC 芯片，如高通的 QCA6335 基带芯片和 QCA6310 射频芯片组合。BB 芯片因其频率相对较低，通常都能支持传导连接测试；

RFIC 芯片因毫米波频段特性限制，天线和 RFIC 利用 AIP(Antenna in Package)技术封装在一起，以致只能通过 OTA(Over The Air)方式进行射频测试。

5.3.1 BBIC 测试

BBIC 是信号收发的基带物理层实现模块，包括了 RX 和 TX 两部分。

5.3.2 BBIC RX 测试

R&S SMW200A 单表不但支持 2GHz 带宽的模拟 IQ 输出，而且也能支持 1X GHz 中频信号输出，满足 DUT 的 IQ 或中频输入要求。SMW200A 直接集成了 WiGig/802.11ad 信号产生功能，无需依托外部电脑即可实时生成信号。



图 24 SMW200A 实现 BBIC 接收测试

SMW200A 的 11ad 信号产生界面支持对 Control PHY/SC PHY，MCS，Code Rate，Header，FCS 以及信道编码前原始数据等进行灵活设置，非常方便用于 BBIC 物理层接收验证或整机灵敏度测试。

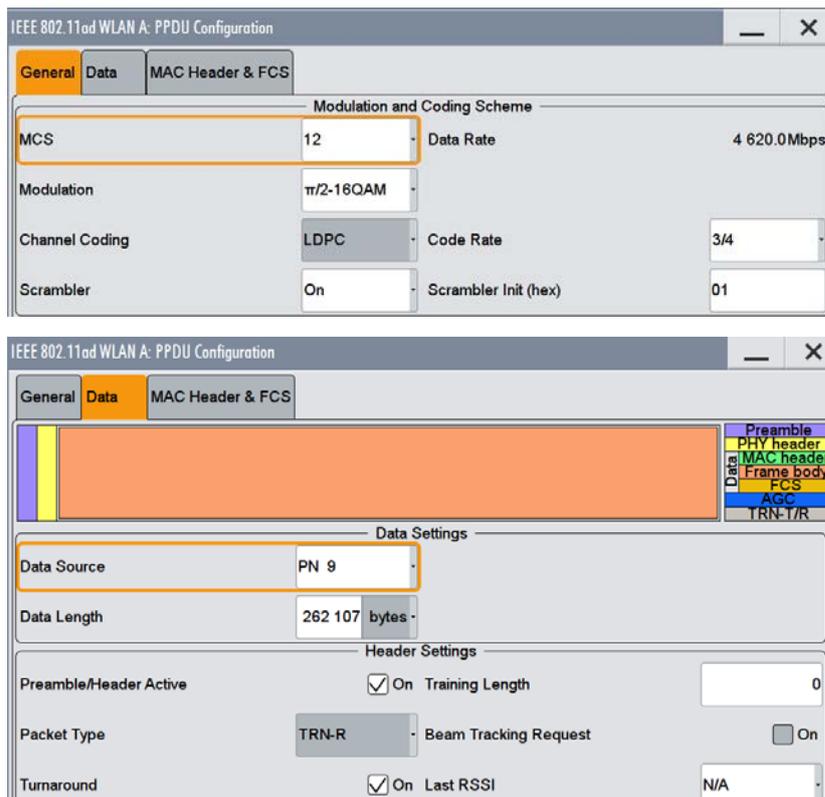


图 25 SMW200A 的 11ad 信号产生设置界面

5.3.3 BBIC TX 测试

搭配 4 GHz 带宽高端示波器 R&S RTO2044，频谱与信号分析仪 R&S FSW67 支持中频频率大于 5.5 GHz 的 11ad 信号解调；如果 BBIC 不是中频信号输出，而是单端或差分 IQ 输出，只需要两根或四根 IQ 线连接到示波器即可。

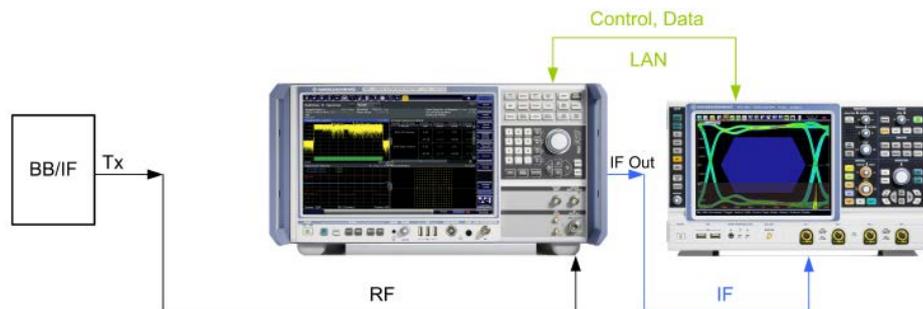


图 26 FSW67 + RTO2044 分析 802.11ad 中频信号

5.3.4 RFIC 测试

RFIC 实现了 11ad 信号的调制和解调，以及通过多路移相器产生和接收 16 路甚至多达 256 路的 Beamforming 信号，完成高指向性射频信号收发，补偿在 60GHz 毫米波频段传输带来的高路径损耗。

5.3.5 LO 相噪测试

本振的相噪指标影响发射机的调制信号质量、邻信道泄露抑制度，以及接收侧信号质量和误码率。由于无线高速数据传输离不开高阶调制，也就意味着对本振相噪指标有较高要求。但是，毫米波频段器件相噪水平和我们熟悉的 6 GHz 以下频段相比却有较大差距，举例而言，如果把 11ac 使用的 5.9 GHz 本振进行 10 倍频得到 60 GHz 本振信号，相噪会随之恶化 $20\log(60/5.9)$ 约 20 dB。因此，在毫米波频段要实现无线传输，不仅考验设备的相噪水平，对测试测量仪表也是挑战。

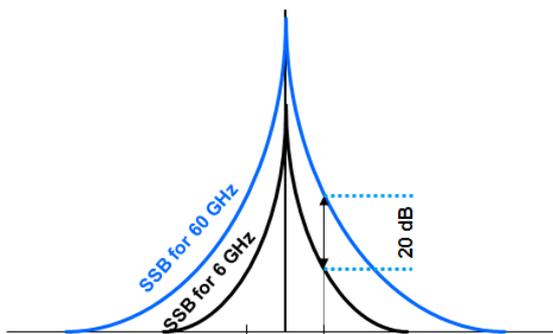


图 27 频综 10 倍频后相噪变化曲线

R&S 借助于自己研发的频综 ASIC 芯片，使高端频谱分析仪 FSW67 在 60GHz 频率，10 kHz 频偏处具备-112 dBc/Hz 的相噪能力，在 1 MHz 频偏处更可达-128 dBc/Hz，满足于市面上各种 60 GHz RFIC(如 Hittite HMC6300 1MHz 频偏-93dBc/Hz)的相噪测试需求，FSW67 拥有足够的裕量保证相噪测量精度。

R&S®FSW-K40: Phase noise sensitivity (typical values) without noise correction Input level > 0 dBm, operating mode "averaged", with R&S®FSW-B4 OCXO precision frequency reference option								
Input frequency	Frequency offset, values in dBc (1 Hz)							
	1 Hz	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	10 MHz
100 MHz	-90	-110	-125	-137	-143	-144	-151,5	-158
500 MHz	-77	-97	-118	-135	-141	-142	-150,5	-157
1 GHz	-71	-91	-112	-130	-138	-140	-149,5	-156
2 GHz	-65	-85	-104	-123	-130	-130	-145	-158
10 GHz	-51	-71	-94	-117	-128	-129	-144	-156
25 GHz	-43	-63	-86	-109	-120	-122	-136	-148
40 GHz	-39	-59	-82	-105	-116	-118	-130	-142
60 GHz	-35	-55	-78	-101	-112	-114	-128	-140

图 28 频谱仪 FSW67 在 60GHz 的相噪测量能力

5.3.6 噪声系数 NF 测试

噪声系数直接决定了接收机灵敏度能力，是射频研发阶段必不可少的一个测试环节。FSW67 在 60 GHz 频段具备-155 dBm/Hz 的典型底噪值，只需在 FSW67 频谱分析仪上选装噪声系数测量选件 FSW-K30，再结合 Noisecom 公司的 60GHz 噪声系数测试附件 NC5115-60G/GT，无需任何外部谐波下变频器就能非常方便地完成 802.11ad 接收机噪声系数测试，并且支持 WR15 波导口或者 1.85mm 同轴口两种接口。

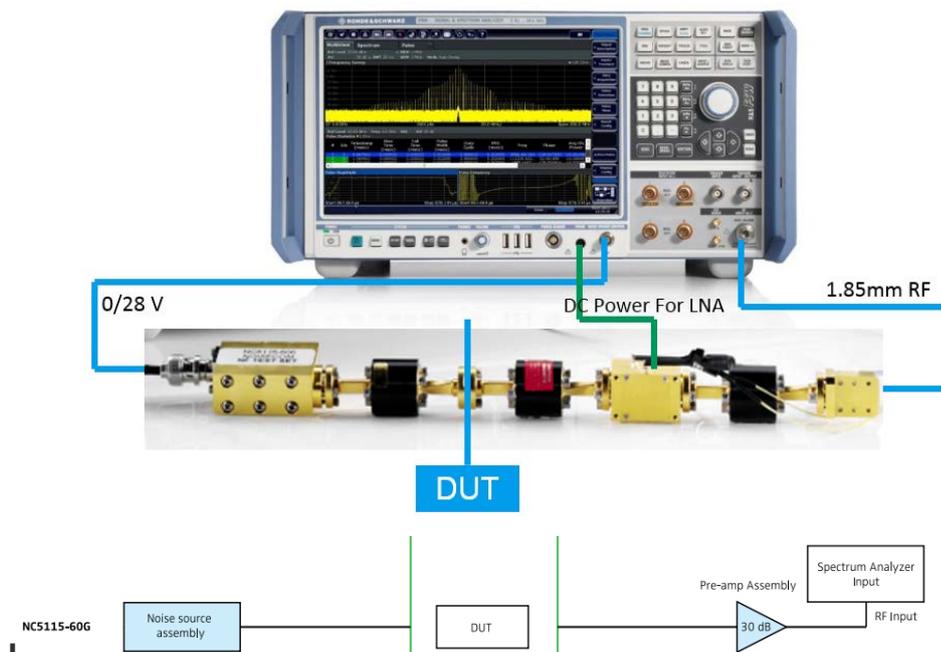


图 29 FSW67 的 60 GHz 噪声系数测试

图 30 是 FSW67 在测试一款 Wireless HD/11ad 低噪放的噪声系数，其中黄色曲线是噪声系数，结果都小于 5dB，另一条青色曲线表示低噪放增益。



图 30 FSW67 的 60 GHz 噪声系数界面

5.3.7 RFIC TX 测试

SMW200A 单表输出差分 IQ 或者中频 IF 信号作为 RFIC TX 测试的输入，再利用 FSW67 + RTO 对 60GHz 毫米波信号完成 2.3 章节和发射机相关的测试项目。

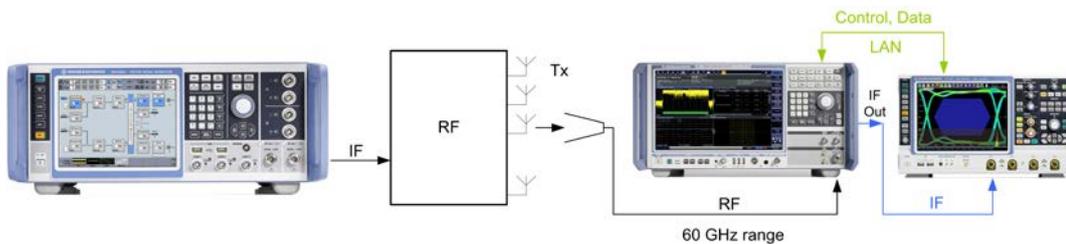


图 31 RFIC TX 部分测试框图

5.3.8 RFIC RX 测试

为了能够产生 60 GHz 频段 2 GHz 带宽的 11ad 信号，需要一台具备 2 GHz 带宽的 SMW200A，并搭配 60 GHz 专用的矢量上变频器 SZU100A。SMW 和 SZU 之间通过 USB 线+差分 IQ 线线束进行连接，一旦连接好后，SZU100A 就是不可见的黑盒，信号产生所需的所有参数设置都在 SMW 界面上完成。SMW+SZU 组合在输出 MCS12 16QAM 信号时具备低至-34 dBc 的优异 EVM 值，保证了 RFIC RX 测试时射频输入端的信号质量。

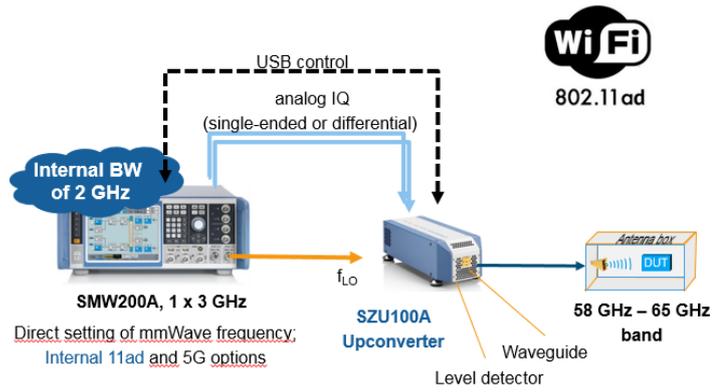


图 32 SMW 和 SZU 连接图

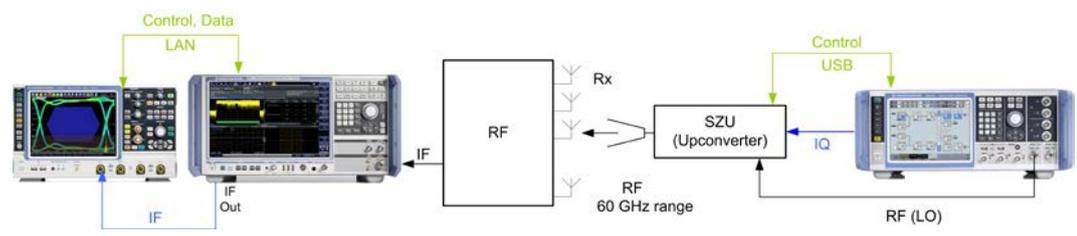


图 33 RFIC 的 RX 部分测试框图

5.3.9 终端整机测试

5.3.9.1 射频质量测试

对于 11ad 设备整机测试，发射和接收的射频指标要求如下，对于 MCS12 调制编码方式，要求发射机 EVM 优于-21 dBc，接收机灵敏度高于-53 dBm。

PHY Type	MCS	EVM	Sensitivity
Ctrl PHY	0	-6	-78
	1	-6	-68
	2	-7	-66
SC PHY	3	-9	-64
	4	-10	-64
	5	-12	-62
	6	-11	-63
	7	-12	-62
	8	-13	-61
	9	-15	-59
	10	-19	-55
	11	-20	-54
	12	-21	-53

表 3 不同 MCS 的 EVM 和灵敏度要求

SMW+SZU 组合不仅输出信号质量优异，而且具备 100 dB 的大动态范围，典型功率范围 [-90, +10]dBm，精度保证值可达 2 dB，非常适合各种 MCS 等级下的接收灵敏度测试。RX 测试连接图如下。

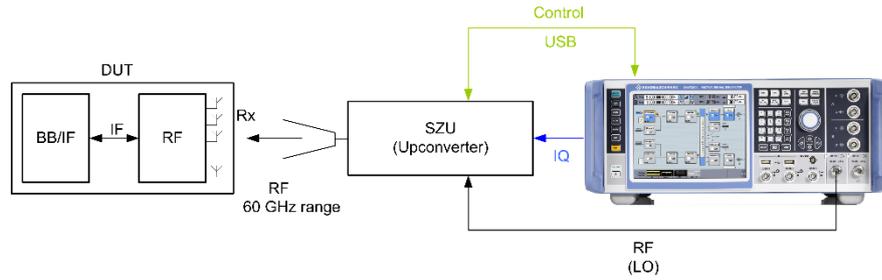


图 34 终端接收指标测试

整机 TX 测试同 RFIC 的 TX 测试，可参考 3.2.3 章节，这里不再累述。

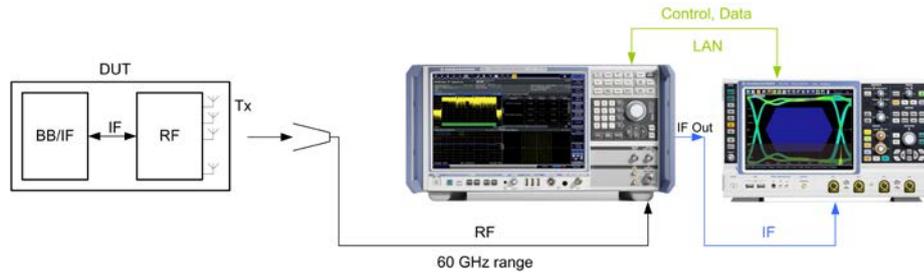


图 35 设备发射指标测试

5.3.9.2 有源天线 OTA 测试

不同于 2.4/5 G 频段的 WLAN 设备，毫米波设备的天线和收发信机两者封装在一起形成天线模块，无法提供射频接口进行传导连接测试，因此 OTA 测试是毫米波芯片或终端测试的唯一方案。

R&S 提供 11ad 有源天线一站式测试解决方案，包括了尺寸灵活可定制的暗室 R&S ATS1000，天线分析软件 R&S AMS32，以及配套的测量仪表 (SMW/SZU/FSW67/ZVA67 等)，该方案优势包括：

- 灵活的测试配置场景：一、超高精度的转台方案，二、多探头方案
- 快速且准确的天线测试能力
- 有源天线 TRP, EIRP, TIS, EIS, EVM 等测试
- AMS32 软件实现近场 NF 到远场 FF 转换
- 独创的螺旋扫描(双坐标轴转换)法，获得超快的测量速度



图 36 暗室 ATS1000 的典型测试场景

6. 总结

随着越来越多的手机终端/路由器/平板电脑/VR 头盔加入了 802.11ad 技术，毫米波高带宽和 OTA 等测试要求对芯片研发、设备研发以及生产测试环节带来了新的挑战，罗德与施瓦茨公司提供研发和生产两套解决方案，助力 802.11ad 芯片和设备的开发与测试。

7. 订购信息

信号源 SMW200A		
描述	选件名	货号
Wideband Baseband Generator with ARB (256 Msample), 500 MHz RF bandwidth	B9	1413.7350.02
Wideband Baseband Main Module, two I/Q paths to RF	B13XT	1413.8005.02
100 kHz to 6 GHz	B106	1413.0104.02
100 kHz to 20 GHz	B120	1413.0404.02
Enhanced Phase Noise Performance and FM/φM Modulator	SMW-B22	1413.2207.02
Baseband Extension to 1 GHz RF bandwidth	SMW-K525	1414.6129.02
Baseband Extension to 2 GHz RF bandwidth	SMW-K527	1414.6158.02
Wideband differential analog I/Q outputs	SMW-K17	1414.2346.02
IEEE 802.11ad	SMW-K141	1414.1333.02

11ad 专用矢量上变频器 SZU100A		
描述	选件名	货号
IQ Upconverter, base unit, (including combined differential IQ/USB cable)	SZU100A	1425.3003.02

Frequency Option 57 GHz to 66 GHz, WR15	SZU-B1066	1425.3110.02
Waveguide-coax-adapter WR15-1.85 mm		1324.0600.00

频谱仪 FSW, 2Hz ~ 67 GHz

描述	选件名	货号
OCXO Precision Frequency Reference	FSW-B4	1313.0703.02
RF Preamplifier, 100 kHz to 67 GHz	FSW-B24	1313.0832.66
LO/IF Connections for external mixers	FSW-B21(optional)	1313.1100.43
160 MHz Analysis Bandwidth	FSW-B160(optional)	1325.4850.04
2 GHz Analysis Bandwidth	FSW-B2000	1325.4750.02
WLAN 802.11ad Measurements	FSW-K95	1313.1639.02

示波器 RTO2044

描述	选件名	货号
4 GHz, 20 Gsample/s, 50/200 Msample, 4 channels	RTO2044	1329.7002.44
OCXO 10 MHz	RTO-B4	1304.8305.02
Memory Upgrade, 100 Msample per channel	RTO-B101	1329.7060.02
Memory Upgrade, 200 Msample per channel	RTO-B102	1329.7077.02
Memory Upgrade, 400 Msample per channel	RTO-B104	1329.7083.02

表 4 测试 11ad 选件