

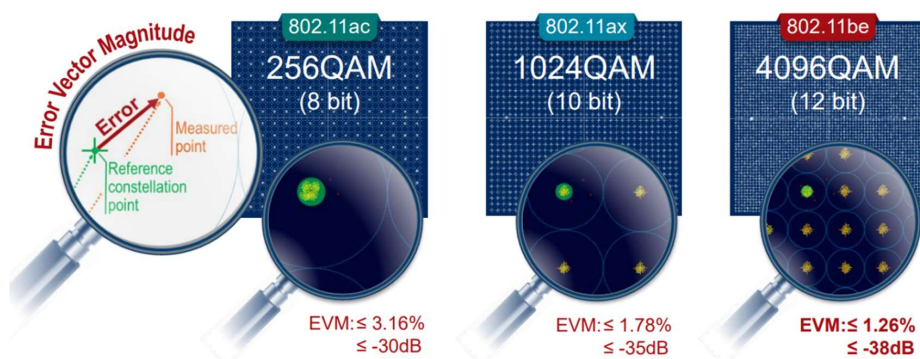
Wi-Fi 7性能评估： 极致EVM分析

1 测试演示

1.1 设备日益增长的EVM要求

Wi-Fi 7为了达到极高的吞吐量，离不开更大的带宽，更高阶的调制方式，当然还有编码率、单位符号时间或者改变另一个维度，更多的空间流，也就是MIMO方案。带宽属于有限的可分配资源，为了提高效率我们上文已经介绍过了MRU和频谱打孔技术，天线数量在终端里也不可能无限制增加，那么调制方案的提升就给我们带来了另一层面的挑战。例如当802.11ac的256QAM提升到802.11be的4096QAM，我们就会发现星座点会如此接近，即使是微小的误差也可能导致相邻星座点的混淆，这就意味着需要一种完美的射频链路来实现-38 dB的EVM，并且要能够支持3个频段，这无疑对射频设计与测试方面都是一个巨大的挑战。为了确保在实际应用中有足够的性能余量，仪器通常要实现比标准要求更低的EVM，往往4096QAM调制的残余EVM需要达到-48 dB或更低，以降低测量不确定度并应对实际操作中的各种不确定因素，如温度变化、硬件老化等。极致的EVM性能对于实现高效稳定和可靠的通信系统中至关重要，特别是在采用高阶调制的Wi-Fi 7通信系统中。

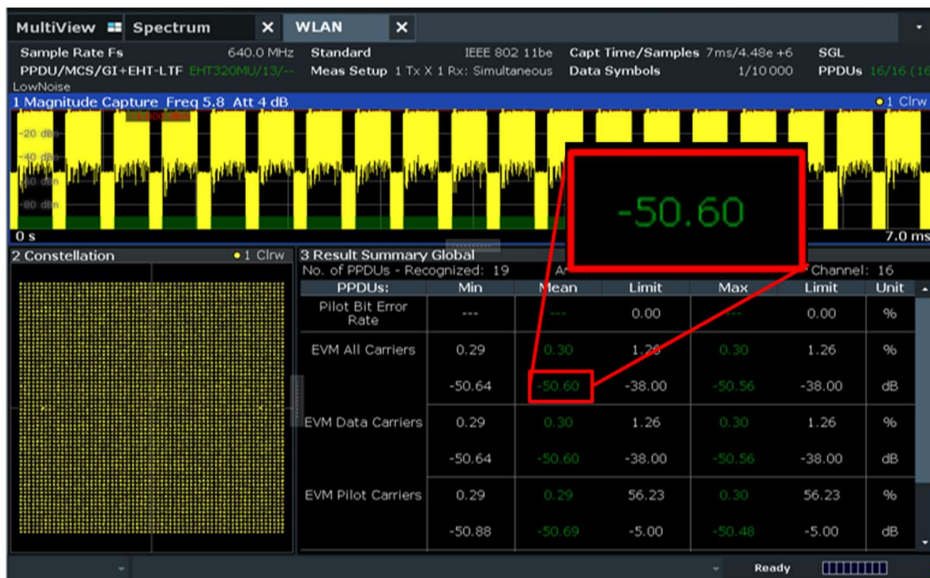
图1.1：越来越高的EVM要求



1.2 优化的EVM测试方法

先回答大家最普遍关心的一个问题，极致的EVM指标是多少？SMW和FSW直连的性能，6 GHz的802.11be信号，320 MHz带宽，4096QAM调制方式，我们直接上图：

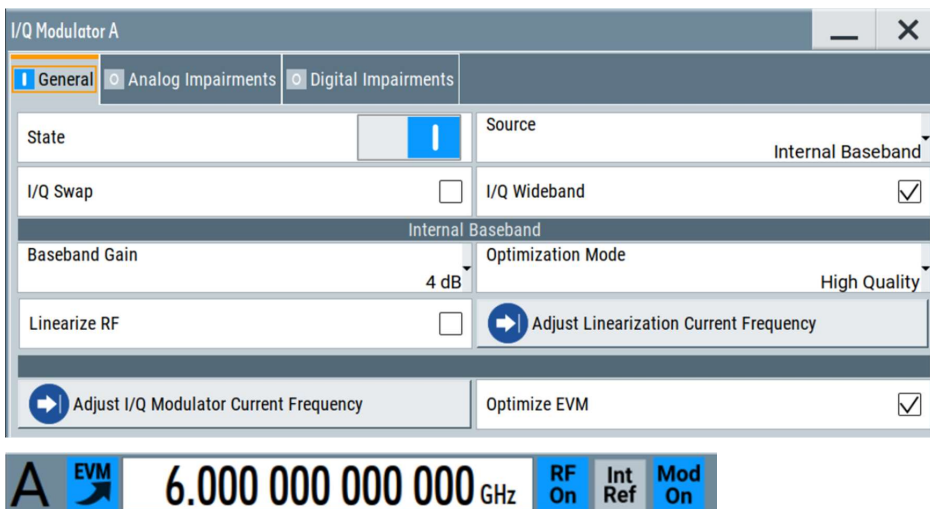
图1.2：Wi-Fi 7信号EVM测试结果



低于-50 dB，这是一个比较理想的数值，但是想要达到极致的EVM指标，我们必须对测试与测量的设备进行一些设置，至少让仪器可以展现出足够的动态范围性能，当然也要考虑到对EVM性能测量产生影响的不同情况。

首先要考虑到EVM的影响因素是信号的频率响应。假设SMW200A的IQ调制器每次生成信号都在没有任何偏移情况下工作，如果每次设置都要注意操作就比较繁琐了，这时进入信号发生器的设置已经实现了一个名为优化EVM的功能，可以更简便地优化操作步骤，激活以后可以看到一个EVM提升的指示。

图1.3：信号源EVM优化功能



另外一个很重要的影响因素，就是如何能运用信号分析仪的最佳动态范围，调整到合适的参考与测量电平。很多朋友都习惯采用FSW的Auto Level功能，这个功能确实可以根据输入信号的平均强度自动调整分析仪内部的衰减与参考电平。但我们这里要谈论的是信号的波峰系数，也就是峰均比，对于一个Wi-Fi的宽带信号来说，带宽和调制阶数决定了波峰系数。如果调平信号波峰系数低，这意味着仍然有提高参考电平的余地来使用信号分析仪ADC完整的动态范围，如果调平信号波峰系数高，我们必须注意峰值功率，以免信号分析仪任何输入阶段的过载，并由足够的余量超过ADC的噪声流。因此，如果比较信号质量，我们必须考虑波峰系数，这会对EVM造成较大的影响，过高过低都会导致测量结果变大。

让我们回到仪器上来优化这个问题。在信号源的基带模块（配备K147选件）具有削峰的设置，802.11be的前导码部分会造成较大的峰均比，这个时候最好的办法就是把前导码部分的信号和数据信号的电平调平，也可以通过Clip Signal Fields to Payload Max Peak这个简易的开关来激活，SMW200A的功率栏也可以看到打开削峰后，峰值功率在降低。这有利于我们更有效地使用信号分析仪的动态范围，而且因为削峰的是前导码序列部分，不影响原本的信号质量。

图1.4：信号源基带前导码削峰

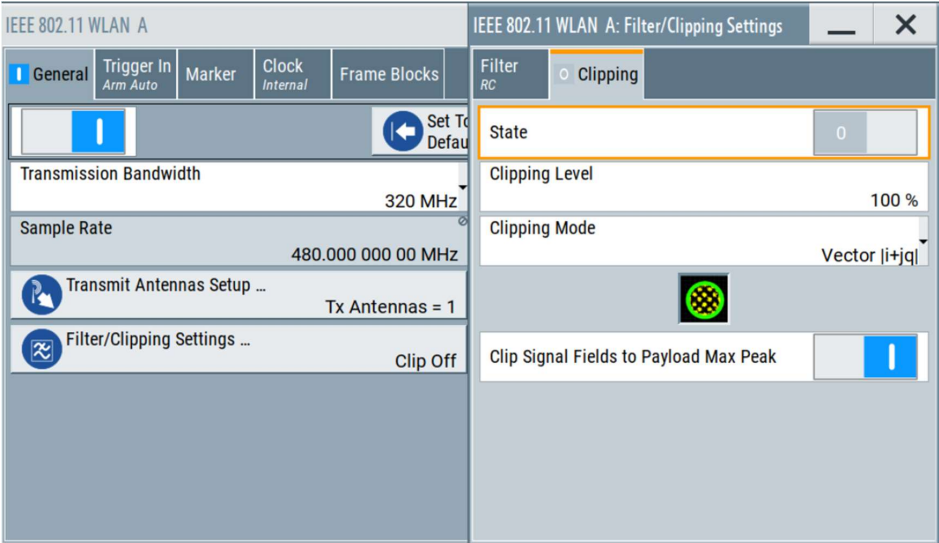


图1.5：削峰后的峰值功率变化



1.3 信道估计

很多朋友都会问我们：“我在进行Wi-Fi信号解调的时候，发现这个信道估计里面有很多选项。打开某个开关后会让我测试到的EVM有好几个dB，我要不要打开？这是否是真实的EVM测试值？”今天就带大家把这些信道估计的功能捋一遍，帮助大家增强对FSW WLAN选件中信道估计多个功能的印象。

首先，我们需要知道信道估计是在Wi-Fi信号解调中用于获取无线信道特性的过程，帮助接收端准确恢复发送的信号。信道估计的目的是消除多径效应和信道衰落的影响，提高通信质量和数据传输效率。

我们先来看看信道估计的设置界面，并给出协议上规定的设备测试要求，以及如何能达到最优的EVM设置。

图1.6：FSW信道估计界面

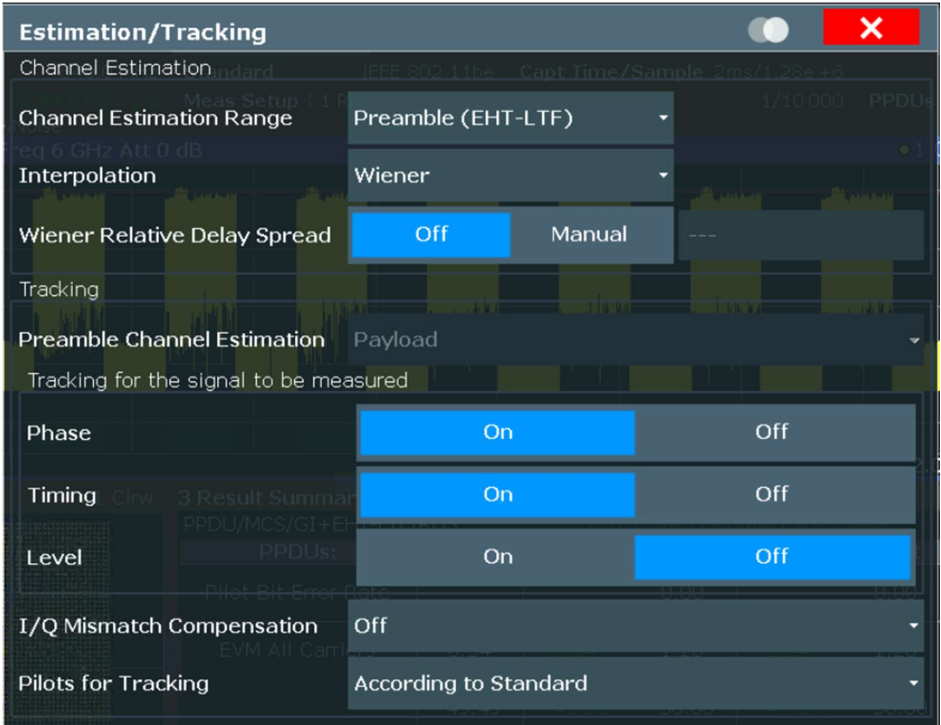


图1.7：信道估计的推荐配置

Setting	Standard conform setting 802.11be, 3.19.4.4.	Setting for best EVM	Comment
CHANNEL ESTIMATION			
Channel Estimation Range	Preamble	Payload	
Interpolation	Wiener / None	Wiener	
Wiener Relative Delay Spread	ON/OFF. tuned manually	ON, tuned manually	The optimum value depends on the channel properties Lower values increase smoothing
TRACKING			
Preamble Channel Estimation	n.a. for 11be	n.a. for 11be	Only available for 802.11ac and n
Phase	ON	ON	
Timing	ON	ON	
Level	OFF	ON	802.11ax places different target EVM values for amplitude drift compensation on and off and 1024QAM; not applicable for 11be
I/Q Mismatch Compensation	OFF	ON	
Pilots for Tracking	According to Standard	According to Standard/ Detected	If the pilot generation algorithms of the DUT has a problem, mode "Detected" might allow:synchronization
EHT-LTF Symbol Duration	6.4 μ sec, 12.8 μ sec	12.8 μ sec	Setting of waveform / signal generator

最先看到的是信道估计范围，有效载荷和前导码之间存在不同，前导码意味着信道估计只能在信号的短部分完成，而有效载荷可以在整个部分或者整个信号上进行，这样可以得到更好的EVM性能结果。默认选项是前导码估计，这是协议对自身产生信号和调制器设备测量的标准。如果是验证一个放大链路的EVM效果，当然可以采用有效载荷估计。

802.11标准允许设备，EVM测试时，在每个子载波上评估复杂信道的响应系数，信道评估是在频域进行的，主要取决于前导码序列中的长训练序列符号（Long Training Field，LTF），并且通过插值的方法得到缺失的子载波用于估计。

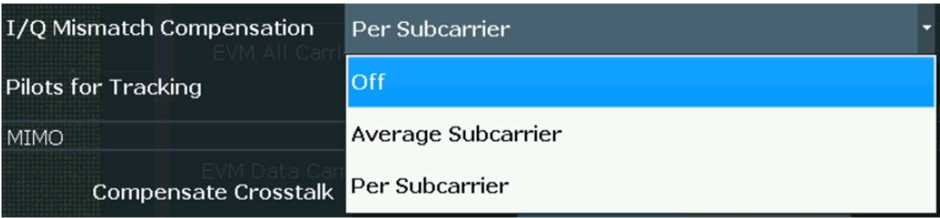
802.11be的物理层提供两种符号长度的LTF序列，6.4 μ s（2*LTF）和12.8 μ s（4*LTF），我们可以在SMW200A内部的WLAN选中配置得到，而在FSW解调时会自动检测LTF的周期。通过在多个重复的LTF周期内做测量和平均可以在具有较长LTF序列的信号中得到更好的均衡训练结果。

信道估计插值的设置只在802.11ax和802.11be中有效，它对信道提供了滤波。一方面可以降低信号噪声，一方面可以降低信号缺失部分插值带来的未使用子载波的影响，我们一般称之为未使用子载波误差（Unused Tone Error）。因此，我们通过信道估计得到了均衡功能的平滑测试结果。

然后，我们在这里也可以做相位时间幅度的追踪，这些和IQ失配补偿相结合，就是另一个层面的EVM优化了。这里相位和时间追踪是根据协议要求默认打开的，但幅度的追踪只在11ax里打开来补偿幅度漂移，11be里暂时不使用。

IQ失配补偿现在可以在每个子载波上的基础上进行。假设每个子载波上都有独立的噪声，做一些平均可以降低频率响应计算的噪声。但是如果在整个频段上做平均，如果实际信号的平坦度较为粗糙，在每个子载波上的功率不尽相同，选择Average Subcarrier反而有可能恶化实际的EVM值，这个时候需要采用per Subcarrier来进行平均以达到更好的效果。

图1.8: IQ失配补偿设置



这个时候我们可以通过把FSW解调界面Display-Result Summary Detailed的功能拖出来，观察此时打开和关闭IQ失配补偿带来的效果，包含I/Q偏移、增益不平衡、I/Q正交偏移以及I/Q之间的时延差。如果你采用的是SMW200A信号发生器作为数据源的话，你还可以在源端进行修正与补偿，具体到每个偏移量找到设备链路上带来EVM恶化的因素，非常适合研发工程师。

图1.9: IQ失配补偿参数

4 Result Summary Detailed						
Tx 1						
	Min	Mean	Limit	Max	Limit	Unit
I/Q Offset	-65.11	-64.61		-64.40		dB
Gain Imbalance	-0.19	-0.19		-0.18		%
	-0.02	-0.02		-0.02		dB
Quad. Offset	0.05	0.06		0.06		°
I/Q Skew	-0.92	-0.84		-0.76		ps

I/Q Modulator A

General

Analog Impairments

Digital Impairments

State

0

I Offset

0.00 %

Q Offset

0.00 %

Gain Imbalance

0.000 dB

Quadrature Offset

0.00 deg

1.4 IQ噪声抵消选件

我们都知道，影响信号与频谱分析仪的残余EVM指标的因素有：

- ▶ 相位噪声：可以通过采用高质量的本振给高端的信号分析仪如FSW带来可靠的EVM测试结果；
- ▶ 频率响应：可以通过仪器内部均衡器的补偿达到一个应用的标准；
- ▶ 非线性：可以通过调整充分衰减来降低影响；
- ▶ 宽带噪声：由仪器本身的噪声系数决定，包含热噪声和各个射频器件的噪声贡献，并且对于更宽的信号有提升。

当然对于宽带噪声的影响，还有一种方法，就是罗德与施瓦茨推出的IQ噪声抵消（IQ Noise Cancellation, IQNC）选件FSW-K575。它从算法的角度上集成在仪器固件中，通过在接收端进行处理，消除IQ不平衡和噪声干扰。原理是将接收到的信号噪声多次测量并进行比较，将接收机功率测量和输入端口负载情况比较就可以得到接收机内部的噪声，多次测量取平均去和参考信号比较可以估计出一个接近理想的无噪声信号，将多次的测量结果和这个平均值做修正运算就可以得到信号外部引入的噪声。这个噪声的减除是在源IQ数据上完成的，纯算法的方式就可以达到3-4个dB的EVM优化，当然这个测量结果

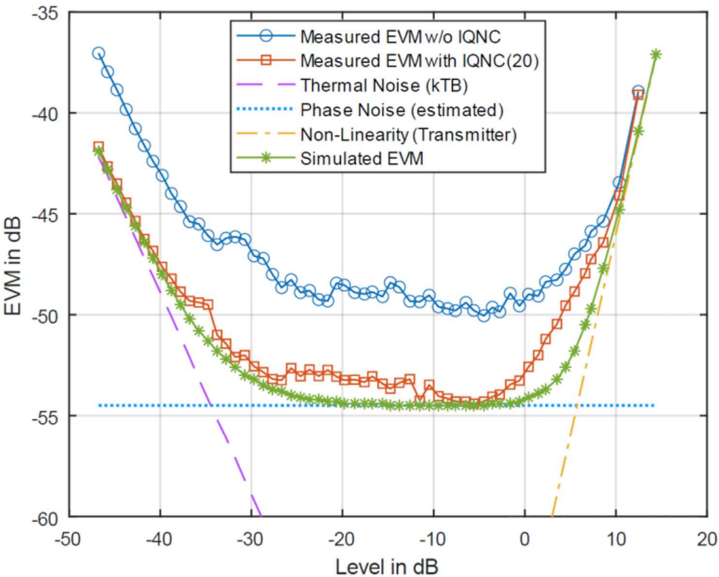
的提升是牺牲一定测量时间换取的。还是以前文中我们所举的那个Wi-Fi 7频率6 GHz，320 MHz带宽，4096QAM调制方式的信号为例，打开20次平均后的EVM就可以达到-54 dB，这个提升在一些具有外部嘈杂噪声的OTA环境或者路径损耗较大的测试场景中有很大的应用价值。

图1.10：802.11be做IQNC 20次平均后的测量结果



因为现在Wi-Fi 7的研发对于EVM的要求越来越高，尤其是一些做WLAN芯片的厂家，需要给后面的射频链路留足够的余量，肯定希望仪器方面能够摒弃一切噪声带来的干扰，提升测试的动态范围，那么IQ噪声抵消选件带来的效果是显著的。比如对于频率6.9 GHz，320 MHz带宽，MCS13的调制方式的输入802.11be信号，在不同输入功率电平下的噪声分布曲线，以及IQNC带来的EVM提升效果见下图：

图1.11：IQ噪声抵消带来的EVM提升



Wi-Fi 7的到来不仅预示着无线通信技术的一次重大飞跃，也为射频设计和测试领域带来了新的挑战。带宽和高阶调制对射频前端设计提出了更高的要求，设计师需要面对信号完整性、功耗、线性度和热管理等一系列复杂的问题。罗德与施瓦茨凭借其身后的技术积累和创新能力，将继续为推动Wi-Fi 7技术的发展和应
应用贡献力量。

2 订购信息

Type	Option	Designation
R&S®SMW200A	SMW-B1007	RF path A 100 kHz to 7.5 GHz
R&S®SMW200A	SMW-B9	Wideband baseband generator with ARB (256 Msample), 500 MHz RF bandwidth
R&S®SMW200A	SMW-B13XT	Wideband baseband main module, two I/Q paths to RF
R&S®SMW200A	SMW-K54	Digital Standard IEEE 802.11 (a/b/g/n)
R&S®SMW200A	SMW-K147	Digital Standard IEEE 802.11be
R&S®FSW	FSW-B512	512 MHz analysis bandwidth
R&S®FSW	FSW-K91	WLAN 802.11a/b/g measurements
R&S®FSW	FSW-K91be	WLAN 802.11be measurements
R&S®FSW	FSW-K575	I/Q noise cancellation