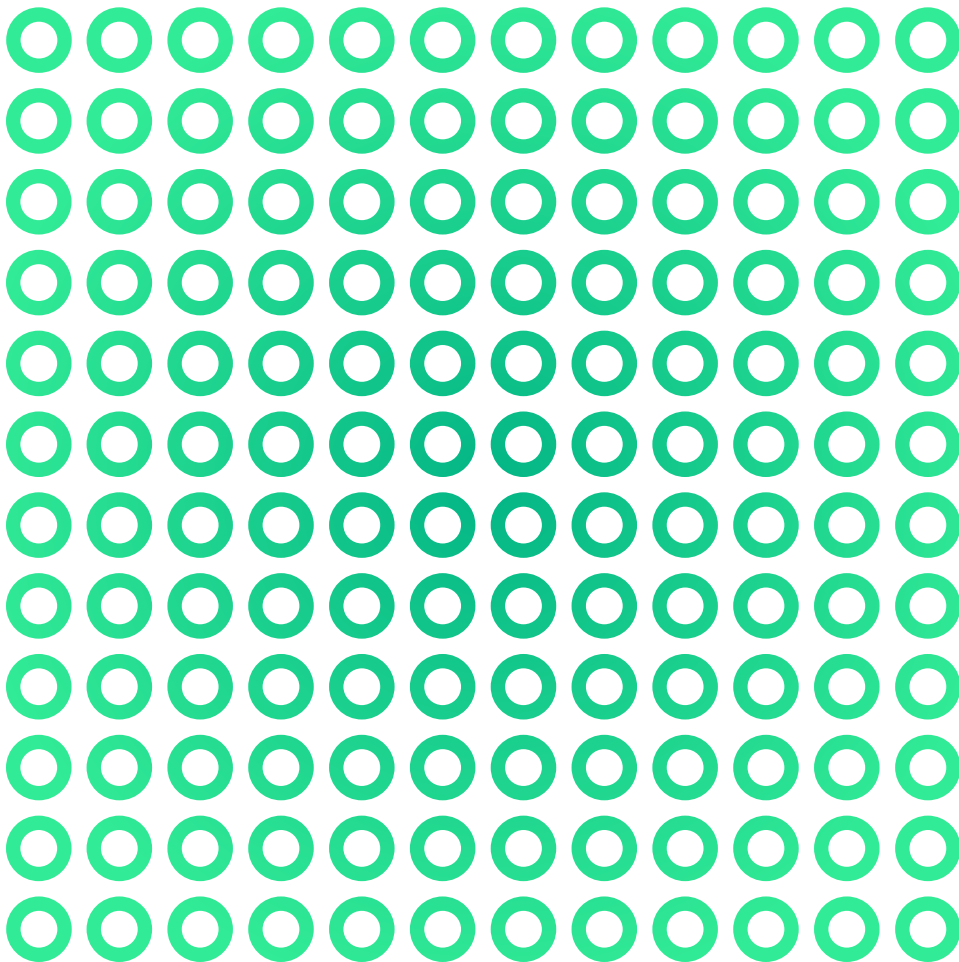




VST 최적화로 Wi-Fi 7 테스트에서 최상의 EVM 마진 달성하기





목차

03 소개

- Wi-Fi 7 과제
- IEEE 준수 테스트
- 이 어플리케이션 노트 안내
- 간략한 PXIe-5842 소개

04 EVM을 저하시키는 요인

- 노이즈
- 노이즈 감소(SNR 개선)
- 비선형 효과(왜곡)
- VST 측정에서 비선형 효과 줄이기
- IQ 손상
- IQ 손상 보정하기
- LO의 위상 노이즈
- EVM에 대한 위상 노이즈 기여도를 개선하기 위한 LO 설정
- 높은 PAPR
- 표준 파라미터를 조작하여 PAPR 개선하기
- 상호 상관을 사용하여 EVM 노이즈 플로어 확장하기

18 측정을 위한 추가 진단 기법(IEEE 비준수)

- 참조 + 데이터 추정
- 채널 평활화
- 노이즈 보상
- 벡터 평균값 연산
- 결론

소개

Wi-Fi 7 과제

802.11be 또는 EHT(Extreme High Throughput)로 알려진 Wi-Fi 7의 IEEE 정의는 이전 버전인 802.11ax를 기반으로 더 높은 처리량과 효율성을 약속합니다. 다중 사용자 패킷을 위한 유연성이 추가되고 대역폭 옵션이 증가하면서 테스트 장비를 최적화하고 RFIC의 정확한 EVM 측정을 달성해야 하는 고유한 과제가 따라옵니다. 허용되는 설정에는 11ax의 이전 최대 대역폭의 두 배인 320MHz 채널이 포함되며, 이로 인해 다중 사용자 리소스 단위를 지원하는 프리앰블의 포맷은 자연스럽게 웨이브폼의 PAPR(피크 대 평균 전력비)을 증가시켰습니다. 11ax와 마찬가지로 칩 또는 측정 디바이스의 송수신 기능에서 보다 높은 변조 정확도를 요구하는 최대 4096-QAM의 조밀한 성상도도 있습니다.

대역폭이 증가하는 경우, 신호는 채널의 스펙트럼에서 2배의 노이즈를 갖게 되어 이론상 EVM 성능은 3dB 저하됩니다. 이는 DUT(Device Under Test)의 변조/복조 정확도와 측정 계측기 자체의 EVM 노이즈 플로어 또는 잔류 EVM 플로어에서도 마찬가지입니다. 늘 그렇듯이 측정 디바이스가 DUT보다 성능이 좀 더 뛰어나 측정이 계측기의 영향을 받지 않도록 하는 것이 중요합니다. 이를 일반적으로 EVM 노이즈 플로어 마진이라고 하며, 일반적으로 4dB 이내 또는 그 이상이면 충분합니다. 일부 엔지니어링 팀은 가능하다면 10dB 이상의 마진을 요구할 수 있지만 이는 대체로 주관적인 선호의 문제입니다. 기술과 칩의 성능이 향상됨에 따라 루프백(RF 입력에 직접 케이블로 연결된 RF 출력)에서 측정 장비를 평가하여 EVM 노이즈 플로어 마진이 허용 가능한 수준인지 확인하는 것이 중요합니다.

물론 트리거 기반 PPDU처럼 Wi-Fi 7에서 정의한 다른 기능도 있지만 모든 Wi-Fi 7 기능에 대한 완전한 설명은 이 어플리케이션 노트의 범위를 벗어납니다. 이 논의에서는 DUT TX(송신) 테스트와 RX 감도 테스트(논의할 낮은 PAPR을 위한 생성기 최적화가 해당되는 경우)의 변조 정확도(ModAcc)를 평가하기 위해 측정 디바이스의 최상의 EVM 플로어를 달성하는 데 엄밀히 초점을 맞춥니다.

IEEE 준수 테스트

11be용 IEEE 표준 초안 문서는 테스트 엔지니어가 변조 정확도 테스트를 위해 DUT 성능을 정량화할 수 있는 일반적이거나 표준화된 방법을 정의합니다. 이는 통합할 특정 구성요소의 성능 데이터를 평가할 때 공통 테스트 방법론에 의존하여 공정한 비교를 할 수 있는 한 방법입니다.

또한 IEEE를 준수하지 않지만 채널 평활화와 같이 유용한 진단 도구 역할을 할 수 있는 몇 가지 추가적인 테스트 방법이 있습니다. 이들은 엔지니어가 선택적으로 적용할 수 있는 기능이지만 상관 분석을 위해 계측기 또는 데이터 세트를 비교할 때 이러한 기능을 알고 있으면 도움이 됩니다.

또한 테스트 엔지니어는 동적 조건에서 작동되는 동안 EVM을 측정하여 패킷에 전원이 "적시" 공급될 때 DUT EVM 성능을 시뮬레이션하고 공정하게 나타내기를 원할 수도 있습니다. 테스트는 패킷 시작과 함께 DUT를 활성화하여 수행됩니다. 디바이스 설계에서 에너지 효율성에 중점을 두면서 전력 증폭기 같은 구성요소가 실제 시나리오에서 어떻게 작동할지 이를 통해 보다 잘 나타낼 수 있습니다. 최종 디바이스들은 일반적으로 이 기법을 사용하여 배터리 수명을 연장합니다. 이 방식으로 측정되는 EVM을 다이내믹 EVM(dEVM)이라고 합니다. 이 어플리케이션 노트에서는 dEVM 접근 방식을 다루지 않지만 논의된 모든 최적화는 여전히 적용되며, 어느 경우든 더 정확한 측정으로 이어집니다.

이 어플리케이션 노트 안내

이 어플리케이션 노트는 독자가 WLAN PHY 계층 테스트에 익숙하다는 가정 하에 작성되었으며, RF 프런트엔드 디바이스의 자극 및 측정을 위한 벡터 신호 트랜시버(VST)의 사용을 기반으로 합니다. 논의된 모든 최적화는 EVM 플로어가 이상적이고 평가 가능하도록 VST에서 루프백 테스트로 시연되지만, 테스트를 위해 DUT가 인라인 상태인 경우에도 여전히 적용됩니다. 또한 독자가 WLAN 표준으로 EVM을 계산하는 방법을 이해하고 있다고 가정합니다. 이후 언급되는 모든 EVM은 이 표준을 준수합니다.

간략한 PXIe-5842 소개



이 노트의 예로 사용된 계측기는 NI의 3세대 VST인 PXIe-5842입니다. PXIe-5842는 전용 저위상 노이즈 2채널 LO(Local Oscillator)인 PXIe-5655와 쌍을 이룹니다. 이는 VST의 VSG 및 VSA 경로를 위한 기본 "온보드" LO 소스 역할을 합니다. 두 개의 독립적인 LO를 사용할 수 있기 때문에 생성기와 수신기를 각각 독립적으로 튜닝하면서 동급 최고의 위상 노이즈 성능을 달성할 수 있습니다.

이 시스템 토폴로지의 큰 장점은 생성기와 분석기 간에 LO를 공유(EVM의 위상 노이즈를 줄이는 한 가지 방법으로 논의됩니다) 할 필요가 없기 때문에 각각을 고유한 중심 주파수로 튜닝할 수 있다는 것입니다. 또한 트랜시버(TRx)와 같이 DUT의 포트 하나가 기저대역 주파수(BB)와 인터페이스로 연결되고 다른 포트가 중간 또는 무선 주파수(IF/RF)로 변환되는 디바이스의 경우, 저위상 노이즈 LO는 LO를 공유할 수 없는 최상의 EVM 플로어를 제공합니다.

구성요소의 성능이 향상되고 표준에서 조밀한 성상도와 더 넓은 대역폭으로 노이즈와 왜곡을 극복해야 하는 과제가 늘어남에 따라 계측기의 성능도 점점 더 향상되어야 합니다. PXIe-5842는 다이내믹 레인지가 개선되어 고유한 EVM 성능을 개선할 뿐만 아니라 단일 계측기에서 세 가지 WLAN 대역(2.4G, 5G, 6G)의 전체 주파수를 처리할 수 있습니다.

[PXIe-5842 및 기타 PXI VST에 대해 자세히 알아보기](#)

EVM을 저하시키는 요인

여느 계측기와 마찬가지로 셋팅을 최적화하여 가능한 최고의 성능을 얻을 수 있는 방법이 있습니다. 이를 위해서는 EVM에 영향을 미치는 계측기 셋팅과 WLAN 11be 웨이브폼 자체의 속성에 대한 지식이 필요합니다. 이에 대해 간단히 설명하겠습니다. 첫째, EVM 저하를 초래하는 요인을 검토하는 것이 도움이 됩니다.

EVM을 저하시키는 요인 각각에 대한 설명에 이어 개선을 위해 취할 수 있는 단계를 설명합니다. 각 예는 5.5GHz의 11be 320MHz MCS 13(4096 QAM) 웨이브폼을 사용하여 PXIe-5842에서 보여 줍니다. 이 요소 각각을 확인하면 VST의 최적 EVM 플로어를 얻을 수 있으므로 가능한 최상의 EVM 플로어 마진을 확보하여 DUT 측정 결과에 대한 신뢰도를 높일 수 있습니다.

노이즈

OTA(over-the-air)인지, 전도성(구리 케이블 연결)인지에 관계없이 모든 RF 채널이나 시스템에는 전체 스펙트럼에 걸쳐 균일한 가우스 분포로 노이즈가 존재합니다. 이를 일반적으로 노이즈 플로어라고 합니다. 모든 RF 신호는 노이즈 플로어 전력과 비교한 비율로 신호 전력을 측정할 수 있습니다. 이를 신호 대 노이즈 비(SNR)라고 하며 일반적으로 데시벨(dB)로 표시됩니다.

WLAN 신호를 감지하고 전송된 심볼을 올바르게 복조하는 능력은 전송 중 SNR의 정도에 따라 크게 달라집니다. 채널은 공기 중이건 전도성이건 관계없이 복조 프로세스에서 심볼이 잘못 해석될 수 있는 지점까지 이 비율을 억제합니다. DUT 또는 VSG의 출력 전력에 대해 EVM의 플롯을 생성할 때 일반적인 형태로 "육조 곡선"이라고 하는 것이 나타나는 것을 보게 됩니다(그림 1).

802.11be 320MHz MCS 13

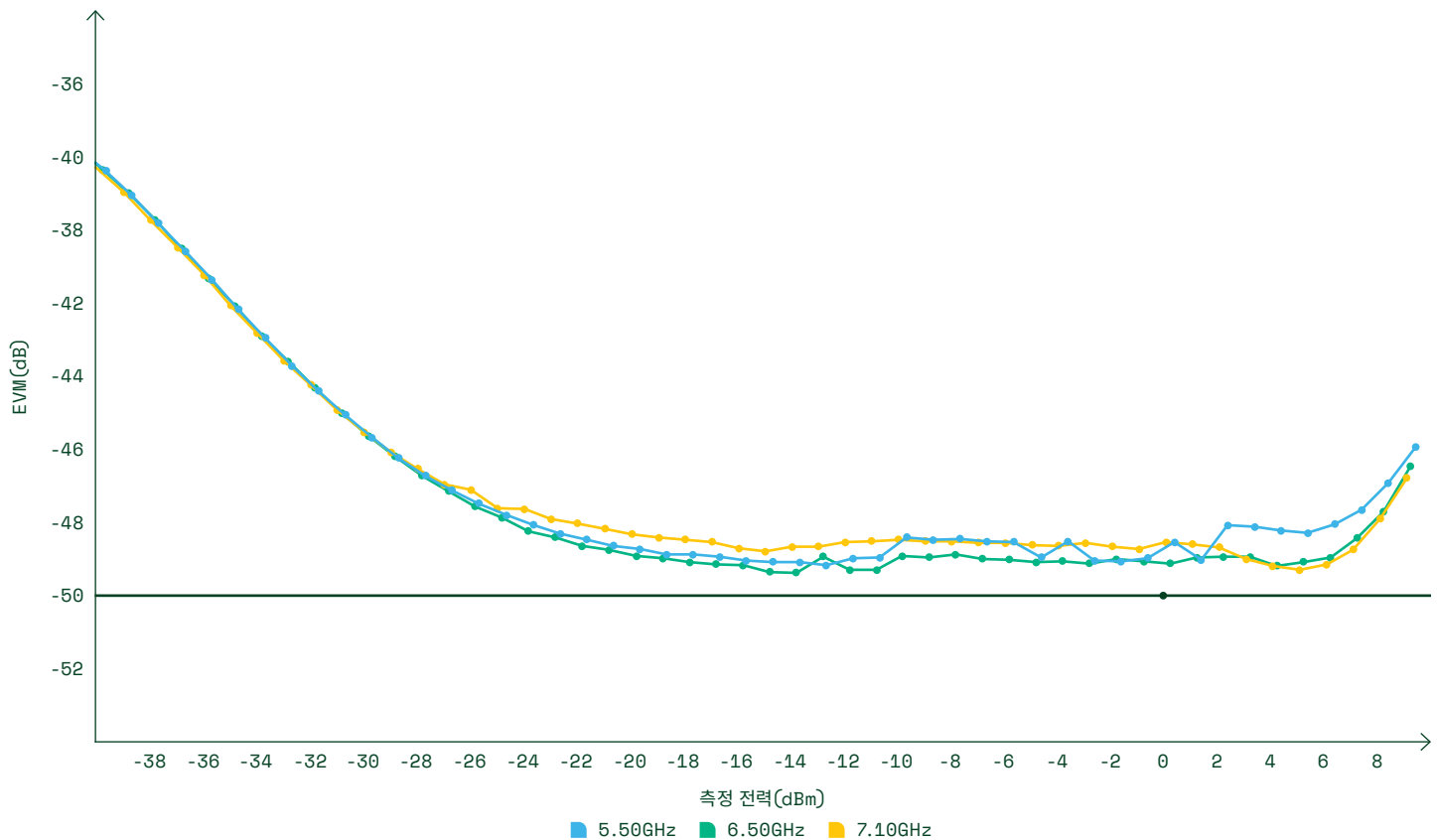


그림 01

PXIe-5842 루프백에서 전력 전반의 11be 320M MCS13 웨이브폼 EVM

그림 1에서 알 수 있듯이 커브의 왼쪽은 출력 전력이 증가함에 따라 개선되는 특정 EVM 레벨에서 시작합니다. 이는 SNR 향상과 각 심볼에 영향을 미치는 노이즈 감소의 직접적 결과입니다. 이런 이유로 왼쪽을 "노이즈가 지배적"이라고 합니다.

또한 경로에 감쇠가 추가되면 그 과정에서 신호 체인의 SNR이 감소하므로 필요한 경우(예: 임피던스 매칭)에만 사용하도록 주의해야 합니다. 신호와 노이즈가 동일하게 증폭되는 PA 테스트의 경우, 출력에 감쇠를 추가하여 VSA가 처리할 수 있는 것보다 높은 출력 전력을 테스트할 수 있습니다.

노이즈 감소(SNR 개선)

노이즈 기여도와 관련하여 EVM 저하를 완화하려면 가급적 신호의 SNR을 높이는 데 중점을 두어야 합니다. 생성되는 신호의 PAPR이 이 부분에서 중요한 역할을 하며 잠시 후에 논의하겠습니다. 다만 이미 이상적이거나 최선이라고 가정하겠습니다.

다음으로 개선할 부분은 DUT와 주고받는 신호 체인입니다. 50Ω 시스템에서 보다 나은 임피던스 매치를 얻기 위해 일반적으로 약간의 감쇠(약 3dB)를 DUT 입력 앞에 삽입합니다. 이 단계에서 너무 많은 감쇠가 발생하면 신호 전력이 낮아지는 동시에 노이즈 플로어에 가까워져 SNR을 더욱 감소시키는 효과가 있습니다. PA가 입력 신호를 증폭하면 신호 전력과 노이즈 전력이 동일하게 증폭되어 SNR이 유지되지만 DUT 출력 뒤에 추가로 감쇠가 삽입되면 SNR도 감소합니다. VSA 프런트엔드의 한계를 초과하는 출력 전력을 측정하려면 출력에 최대 20dB의 감쇠를 추가해야 할 수도 있지만, 이 경우 단점이 있습니다.

테스트 시스템 신호 체인을 계획할 때 이를 고려하는 한 가지 방법은 VST 루프백 육조 곡선의 이상적인 "하한" 범위를 고려하는 것입니다. 그림 2에 나온 것처럼 EVM이 최상이고 비선형 효과가 EVM을 다시 저하시키기 시작할 때까지 계속되는 지점이 계속기 EVM 플로어의 다이내믹 레인지로 간주됩니다.

802.11be 320MHz MCS 13

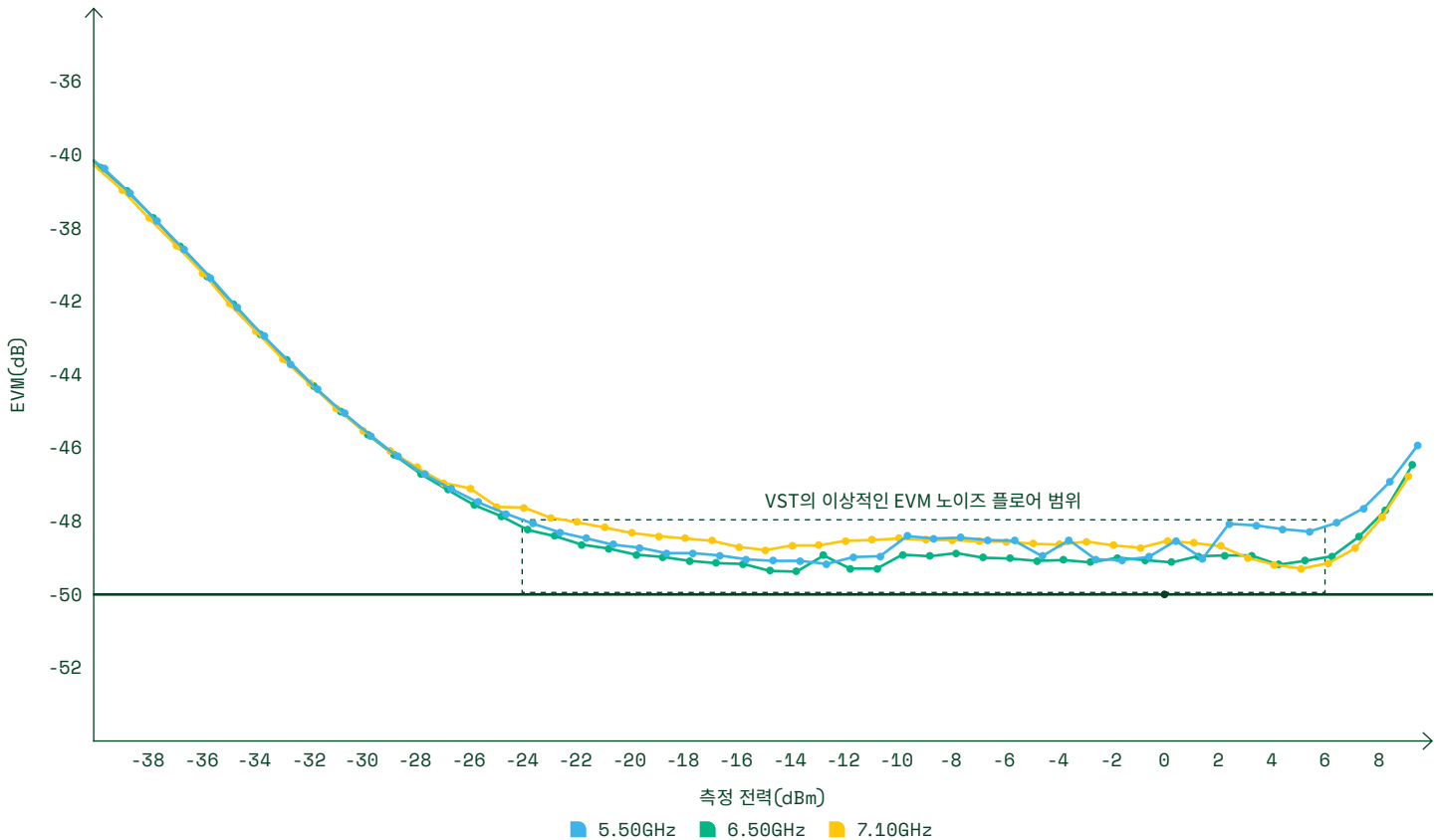


그림 02

최상의 EVM 노이즈 플로어를 위한 VST의 이상적인 작동 전력 범위

이것은 PA에 의해 부스트될 때 더 높은 전력 범위로 외삽됩니다. 따라서 예를 들어 그림 2와 같이 VST의 EVM 플로어가 -22dBm~-5dBm로 이상적인 경우, 이는 게인이 20dB인 PA의 -2dBm~+25dBm 출력 전력의 이상적인 테스트 범위가 됩니다. 출력 전력이 VSA 한계를 초과하므로 10dB 감쇠기를 출력에 추가하여 실제로 VSA 입력에서 보이는 출력 전력은 +15dBm이지만 PA

VST 최적화로 WI-FI 7 테스트에서 최상의 EVM 마진 달성하기

는 여전히 +25dBm에서 출력하며 특성화할 수 있습니다. 여기서 중요한 점은 너무 많은 감쇠가 적용되면 ADC에서 보이는 SNR이 감소하기 시작하여 결과적으로 계측기의 스위트 스폿(또는 이상적인 EVM 플로어)에서 멀어진다는 것입니다.

이러한 RF 신호 체인 효과를 고려하고 최적화한 다음 VSA의 최적 참조 레벨을 설정해야 합니다. 이를 달성하는 한 가지 방법은 RFmx WLAN 의 표준 기능인 참조 레벨 "서보"를 사용하여 ADC 과부하 경고 영역을 침범하지 않으면서 "최상의 EVM" 지점까지 참조 레벨을 반복적으로 낮추는 것입니다. 그림 3에서 보듯 참조 레벨은 웨이브폼의 평균 전력이 -10dBm이고 PAPR이 약 14dB인 신호의 피크 전력으로 설정됩니다. 따라서 참조 레벨은 처음에 +4dBm으로 설정됩니다.

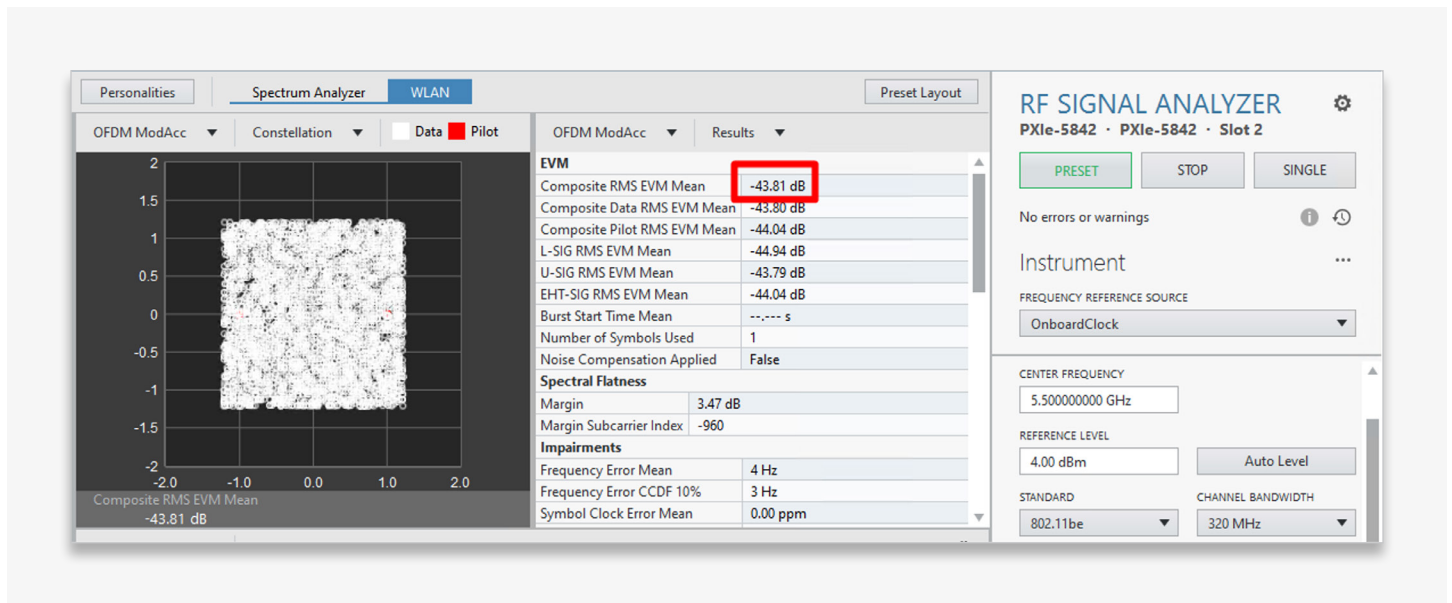


그림 03

일반적인 참조 레벨 세트를 사용하여 11be 320M MCS13 웨이브폼으로 중심 주파수 5.5GHz 및 평균 전력 -10dBm 시 루프백에서 -43.81dB EVM 달성

이제 그림 4에서 ADC 과부하 경고 직전 지점까지 참조 레벨을 줄이면 어떻게 되는지 눈여겨보십시오.

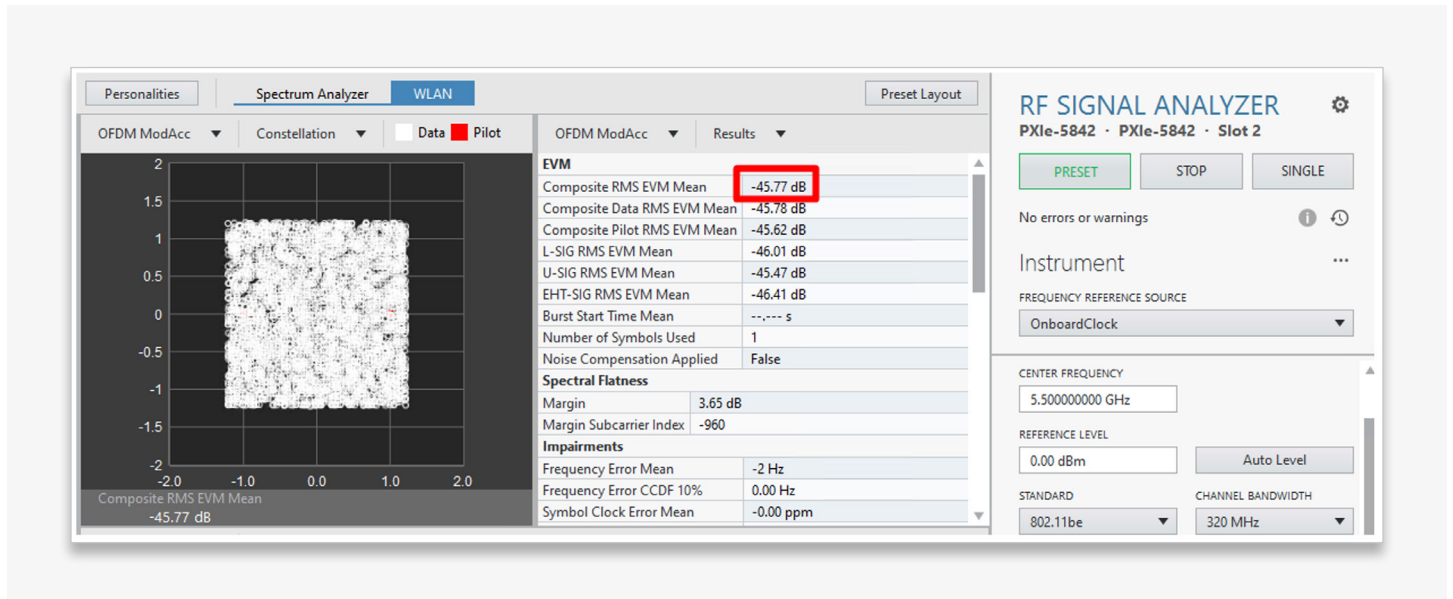


그림 04

최적화된 참조 레벨 세트를 사용하여 11be 320M MCS13 웨이브폼으로 중심 주파수 5.5GHz 및 평균 전력 -10dBm 시 루프백에서 -45.77dB EVM 달성

이 최적화만으로도 EVM을 2~3dB 감소시킬 수 있습니다. ADC 과부하 경고는 프리앰블 섹션만 왜곡하므로 일정 지점까지는 ADC 과부하 경고를 무시할 수 있지만 데이터 부분의 클리핑이 시작되어 결과가 무효화되는 시점을 알기가 어렵습니다. 실제로 참조 레벨이 데이터 EVM이 클리핑되는 지점에 도달하면 그 결과 수치가 급격히 저하되며 실험 중에 이를 관찰할 수 있습니다.

비선형 효과(왜곡)

육조 곡선의 왼쪽(저전력)은 노이즈의 영향을 크게 받기 때문에 비선형 왜곡은 커브의 오른쪽에 큰 영향을 미칩니다. 신호 체인의 모든 비선형 디바이스는 상호 변조 및 하모닉으로 인해 왜곡을 발생시킵니다. 또한 PA는 EVM 품질을 저하시키는 압축으로 인한 비선형 동작을 생성합니다. 그림 1에서 보듯 출력 전력의 특정 지점에서 EVM은 일반적으로 전력 레벨이 증가함에 따라 저하됩니다. 생성된 신호가 전력 증폭단을 통과할 때 VSG가 이러한 효과를 발생시킨다는 점을 인식하는 것도 중요합니다. 궁극적으로 디바이스가 선형적이거나 선형 범위 내에서 더 많이 작동될수록 결과 에러 벡터에 미치는 영향이 줄어듭니다.

VST 측정에서 비선형 효과 줄이기

앞서 언급했듯이 이상적인 EVM 노이즈 플로어의 "다이나믹 레인지" 내에서 계측기를 작동하는 것이 DUT EVM 측정에서 생성기 VSG의 비선형 효과를 방지하는 가장 좋은 방법입니다. 그림 2의 육조 곡선은 루프백에서 생성되므로 이는 테스트를 위한 DUT의 이상적인 전원 입력(Pin)이 됩니다.

IQ 손상

동위상 및 직교위상(IQ) 신호를 사용하는 벡터 신호의 경우, 생성기와 분석기 측의 이산 I 및 Q 신호 경로가 EVM을 저하시킬 수 있습니다. 이러한 IQ "불균형"은 기저대역 모뎀이 포함된 DUT에서도 발생할 수 있습니다. 그림 5는 손상이 거의 없는 이상적인 성장도의 예를 보여 줍니다.

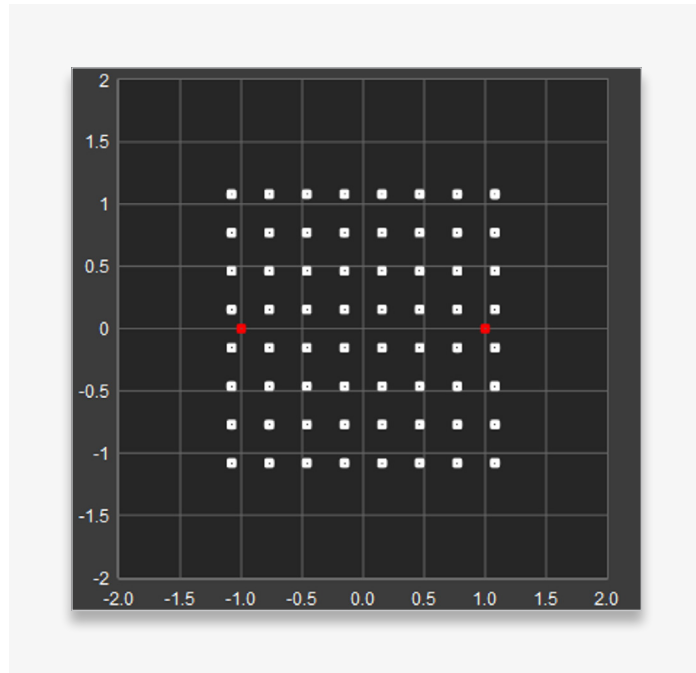


그림 05

이상적 수신에 가까운 64-QAM WLAN 성상도(11be 80MHz MCS 7)

일반적으로 이러한 불균형은 전송 또는 수신된 심볼 성상도의 스큐, 회전, 기타 변형으로 나타납니다(그림 6 참조). I 신호 경로와 Q 신호 경로에서 게인이 약간 다를 경우, 성상도의 I 및 Q 평면에 IQ 게인 불균형이라고 하는 불균형한 전력 범위가 생성될 수 있습니다. I 신호와 Q 신호가 정확히 90°의 위상차로 분리되지 않으면 IQ 직교 에러라고 하는 현상이 발생할 수 있으며, 이는 성상도에서 회전으로 나타날 수 있습니다. 마지막으로 신호 경로 지연으로 인해 I와 Q가 시간상 잘못 정렬되어 성상도 왜곡이 발생할 수 있습니다. 이를 IQ 타이밍 스큐라고 하며, 마찬가지로 직교 에러 및 I와 Q 좌표 평면 사이의 게인 불균형으로 나타납니다.

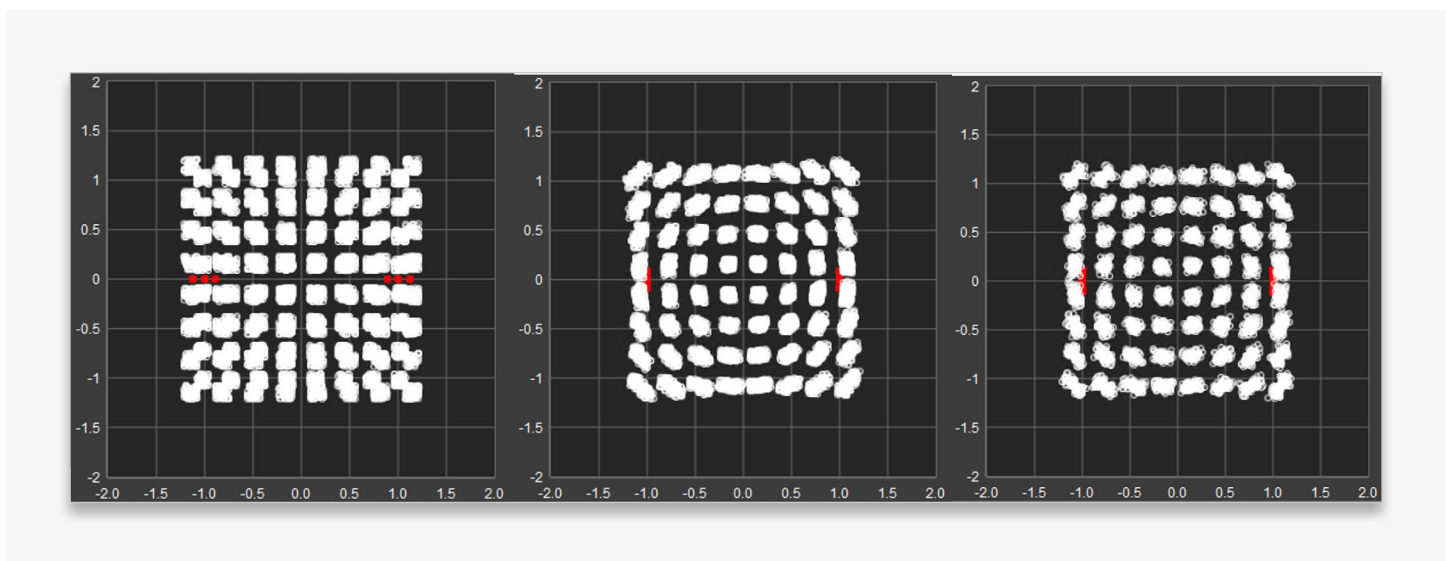


그림 06

왼쪽에서 오른쪽으로 표시: IQ 게인 불균형(1dB), IQ 직교 에러(5도), IQ 타이밍 스큐

IQ 손상 보정하기

RFmx WLAN API를 사용하여 이러한 IQ 손상을 추정하고 보정할 수 있습니다. 이러한 손상은 일반적으로 VST에서는 발생하지 않지만 평가판 보드로 인해 DUT에서 손상이 발생할 수 있는 일부 경우, 이러한 요소를 보정하여 이상적인 구성에서 DUT의 EVM을 표시할 수 있습니다.

IQ 손상에 대해 자세히 알아보기

LO의 위상 노이즈

상향 또는 하향 변환을 위해 기저대역 신호가 RF 믹서에 입력될 때, 사용되는 LO의 성능이 EVM 성능에 매우 중요합니다. LO는 단순히 단일 톤 생성기이며 완벽하게 안정적이지 않습니다. 신호의 시간 영역에서 톤의 불완전성이 지터로 나타납니다. 여기서 신호 피크는 경우에 따라 공통 참조 포인트보다 시간상 빠르거나 늦게 나타납니다. 주파수 영역에서 이는 불완전한 주파수로 해석되며, 위상 노이즈라고 부르는 결과를 낳습니다. 이 효과는 노이즈, 왜곡, IQ 손상의 효과와 함께 의도한 타겟과 비교한 심볼 정확도에 기여합니다. 이 효과를 개선하려면 가능한 한 위상 노이즈가 낮은 LO 소스와 잠시 후에 논의할 완화 기법을 선택하는 것이 중요합니다.

EVM에 대한 위상 노이즈 기여도를 개선하기 위한 LO 설정

LO의 위상 노이즈와 이것이 EVM에 미치는 영향을 개선하는 것과 관련하여, PXIe-5842는 PXIe-5655의 전용 저위상 노이즈 LO를 사용하여 이미 양호한 상태입니다. 그러나 더 높은 품질의 LO를 사용할 수 없다면 어떻게 해야 할까요? 입력과 출력의 중심 주파수가 같은 PA 등의 2포트 디바이스의 경우, VSG와 VSA 간에 동일한 LO 신호를 공유할 수 있습니다. 사실상 이는 생성된 심볼을 위상 노이즈가 일정한 벡터 방향으로 타겟에서 벗어나게 하는 경우에는 항상 분석기가 동일한 벡터 오프셋으로 이를 측정한다는 것을 의미합니다. 즉, 위상 노이즈는 EVM 저하에 영향을 미치지 않습니다. LO를 공유하는 루프백에서 VST의 육조 곡선은 기본적으로 양쪽에서 독립적으로 저위상 노이즈 LO를 사용할 때와 성능이 동일하다는 것을 알 수 있습니다. PXIe-5842의 이점은 원하는 경우 LO를 공유할 수 있는 옵션(이 옵션이 여러 채널 간의 위상 일관성 또는 MIMO에 여전히 유용한 경우도 있습니다)이 있다는 것이지만 뛰어난 EVM 플로어를 달성하는 데 반드시 필요한 것은 아닙니다.

LO를 공유하거나 고품질 LO를 사용하여 각 믹서를 구동하면 EVM 플로어도 일반적으로 2~3dB 개선됩니다.

높은 PAPR

서두에서 언급했듯이 802.11be는 다중 RU 집합("RU"는 IEEE 초안에 정의된 단일 리소스 단위)을 통해 여러 사용자에게 동시에 서비스를 제공할 수 있는 유연성을 제공하는 여러 기능을 도입했습니다. 프리앰블에는 각 사용자의 패킷 전송 스케줄링과 각 사용자의 채널 할당에 대한 세부사항이 포함되어 있습니다. 이는 이전 표준에서 OFDMA 기법이 도입된 이후로 사실이지만, 11be에는 단일 사용자에게 서비스를 제공하기 위해 RU를 집계하는 보다 동적인 방법이 추가되었습니다.

시간을 들여 이 기능들을 상세히 논의하지는 않겠지만 이 노트에서 중요한 점은 프리앰블의 포맷이 패킷의 데이터 부분에 비해 전력 레벨이 더 가변적일 수 있다는 것입니다. 11ax 웨이브폼 및 이전의 PAPR과 비교하면 일반적으로 10 또는 11dB를 초과하지 않았습니다. 11be 웨이브폼의 현재 초안은 PAPR이 11dB에서 최대 16dB 사이일 수 있으며, 이는 SNR에 영향을 미칩니다. 따라서 분석기가 측정할 수 있는 범위는 EVM이 계산되는 WLAN 패킷의 데이터 부분의 전력에 가깝습니다.

그림 7은 11be 초안의 후속 업데이트에서 정의된 실제 11be 320MHz 신호와 함께 11be의 초기 프로토콜만 사용되었던 오래된 11ax 320MHz 신호의 전력과 시간을 비교한 것입니다. 이를 통해 VSA 참조 레벨을 얼마나 낮게 설정하면 데이터 부분의 피크 전력에 도달할 수 있는지 고려할 때 PAPR로 얼마나 큰 차이가 나는지 알 수 있습니다.

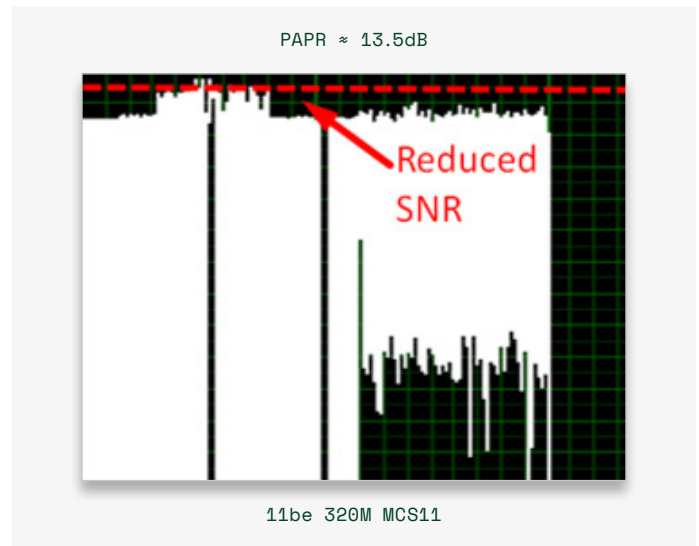
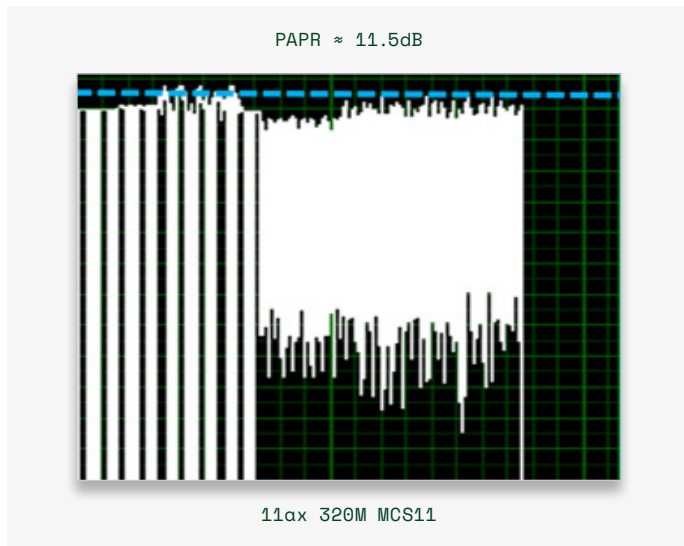


그림 07

11ax 320M 프록시와 11be 320M 비교를 통한 PAPR 증가 확인

그림에서 각 점선은 데이터 부분의 피크 전력(더 높은 전력 프리앰블 다음에 오는 더 낮은 전력 섹션)에 최대한 근접하도록 설정된 전위 참조 레벨을 나타냅니다. 참조 레벨을 이 지점까지 낮추면 프리앰블의 일부 피크 샘플이 무시될 수 있습니다. 이 샘플들이 생성하는 ADC 과부하가 크지 않기 때문입니다. 따라서 데이터 부분에 비해 프리앰블의 피크 전력이 높을수록 ADC 과부하 전의 이 한계가 높아지므로 EVM 측정의 SNR이 더 나빠집니다. 앞으로 논의할 PAPR을 낮추는 기법은 이 문제를 완화하는 데 도움이 됩니다.

표준 파라미터를 조작하여 PAPR 개선하기

서두에서 언급한 것처럼 11be 웨이브폼은 이전 WLAN 표준보다 훨씬 높은 PAPR을 생성할 수 있기 때문에 EVM 저하와 관련하여 PA 설계자와 테스트 엔지니어 모두에게 문제가 됩니다. PAPR이 높다는 것은 PA가 선형 영역에서 작동하는 동안 선형화 확장에 디지털 전치왜곡 같은 기법을 사용하지 않는다고 가정할 때, 더 높은 피크 샘플이 비선형 왜곡을 생성할 가능성이 더 높다는 것을 의미합니다. VST 같은 계측기의 경우, 분석기의 참조 레벨 임계값이 더 높아지게 되며, 따라서 EVM이 측정되는 WLAN 패킷의 데이터 부분에서 더 멀어집니다.

그림 8은 표준 11be 320MHz MCS 13(4096-QAM) 웨이브폼과 약 14dB로 계산된 PAPR을 보여 줍니다.

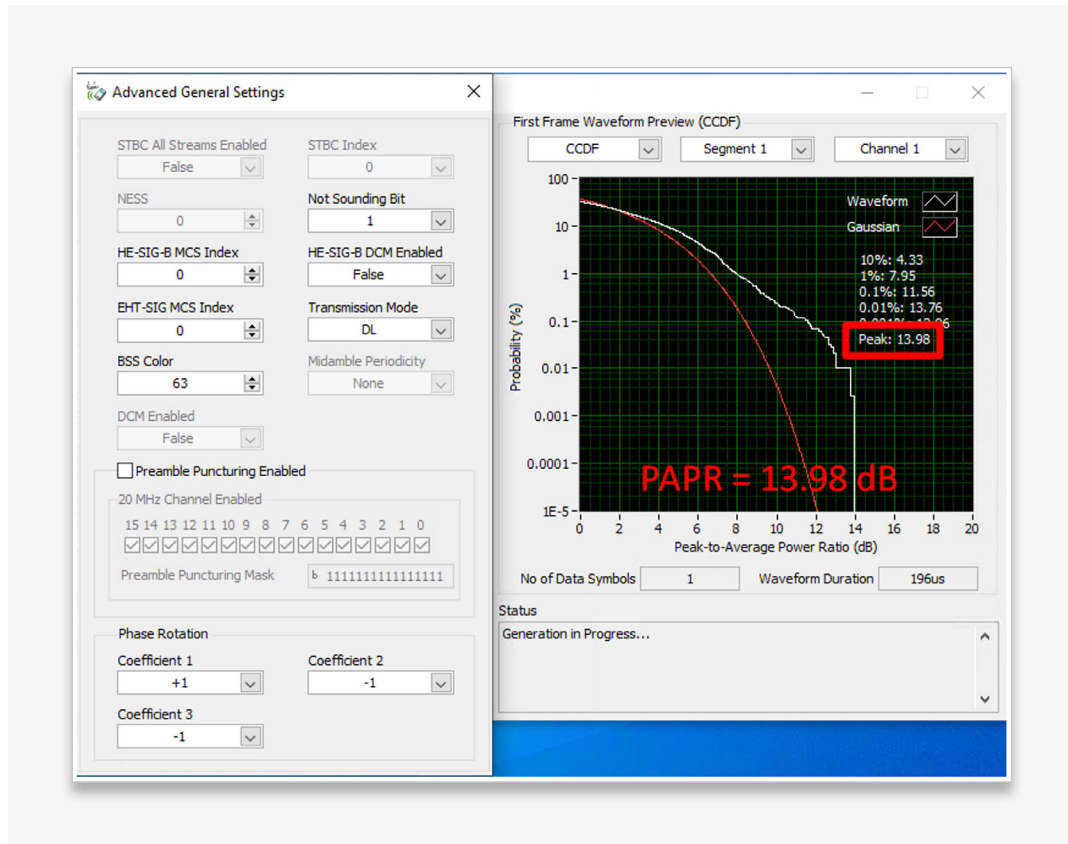


그림 08

11be 320MHz MCS23 웨이브폼(1 심볼)

이 경우 PXIe-5842에서 얻을 수 있는 EVM 플로어는 그림 9와 같이 약 -45.44dB EVM(참조 레벨 최적화와 저위상 노이즈 LO 사용)입니다.

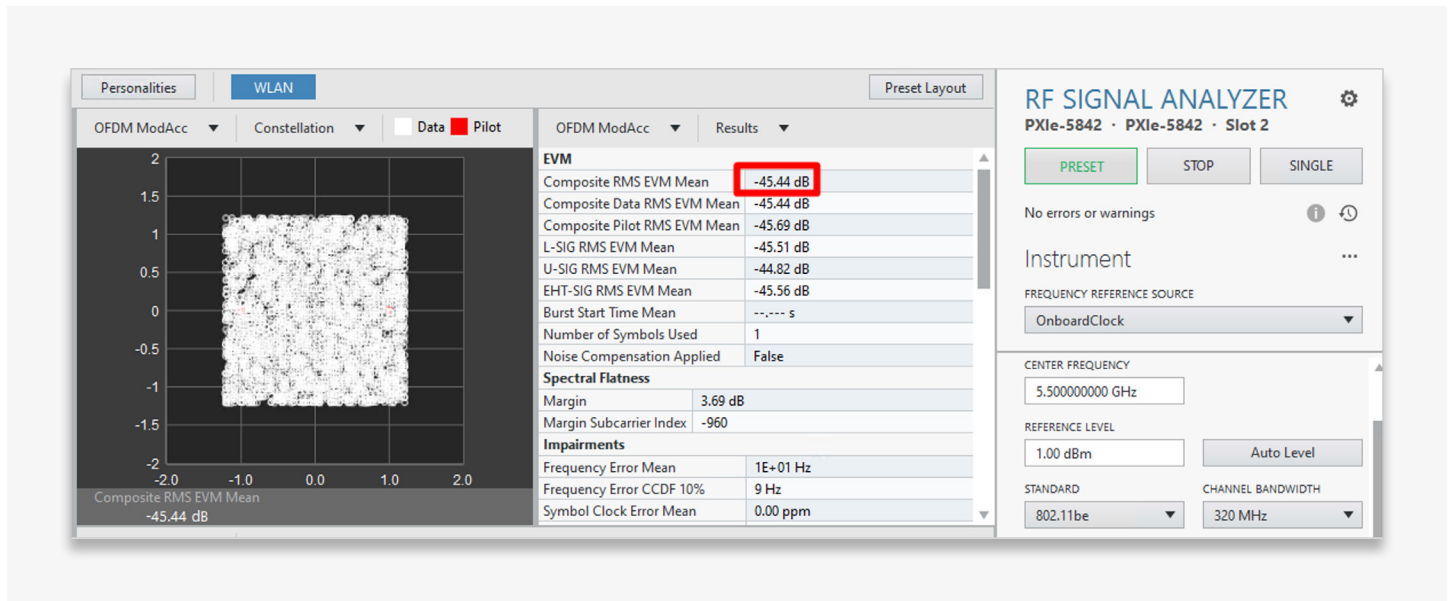


그림 09

PXIe-5842에서 -45.44dB EVM으로 11be 320MHz MCS13 루프백 측정

PAPR은 파고율 저감(CFR)이나 디지털 전치왜곡(DPD) 같은 기법을 통해 개선할 수 있지만, 두 경우 모두 IEEE 측정 스펙 내에서 PAPR을 줄이는 표준화된 방법은 없습니다.

또는 보다 유리한 PAPR을 생성하기 위해 조작할 수 있는 헤더의 몇 가지 속성이 있습니다. 특히 320MHz 대역폭의 경우, IEEE는 정확히 이 과제를 해결하기 위해 위상 회전이라는 개념을 허용했습니다. 위상 회전은 각 프리앰블 심볼의 위상을 조작하여 샘플 피크를 감소시킨 다음 복조기(수신기)에서 되돌릴 수 있는 기술입니다.

VST 최적화로 WI-FI 7 테스트에서 최상의 EVM 마진 달성하기

다른 표준 필드와 함께 위상 회전을 활용하면 다음과 같은 개선이 가능합니다.

1. 모든 위상 회전 계수를 -1로 설정:

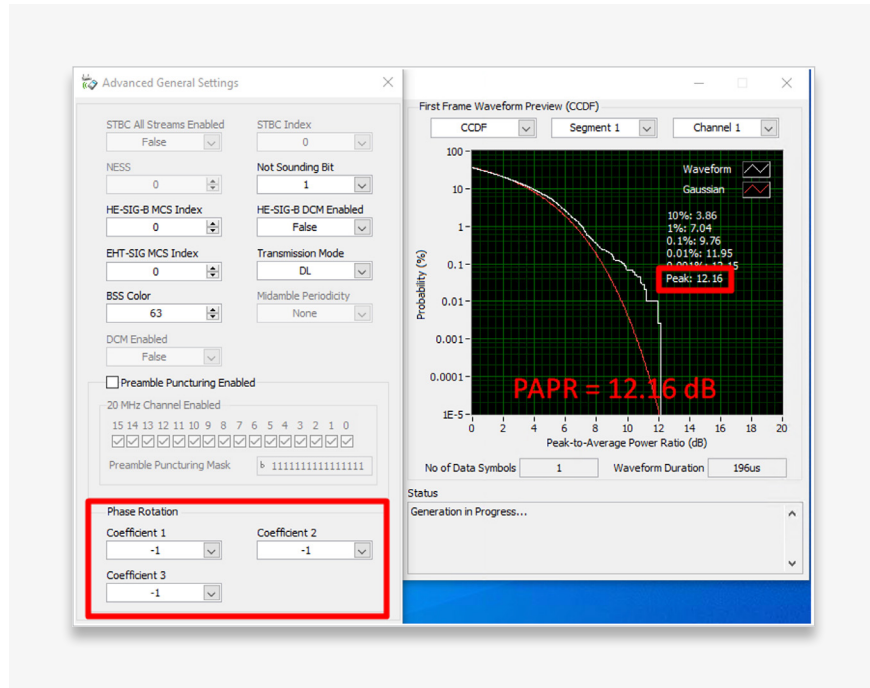


그림 10

11be 320MHz 고급 셋팅에서 위상 회전 계수를 -1로 설정하여 12.16dB의 PAPR 달성

2. EHT-SIG MCS 인덱스를 2(11be에서 여러 변조 타입을 지원하는 신호 필드)로 설정하고 BSS Color 셋팅을 실험하여 PAPR을 더욱 개선합니다(이 경우 BSS Color = 58).

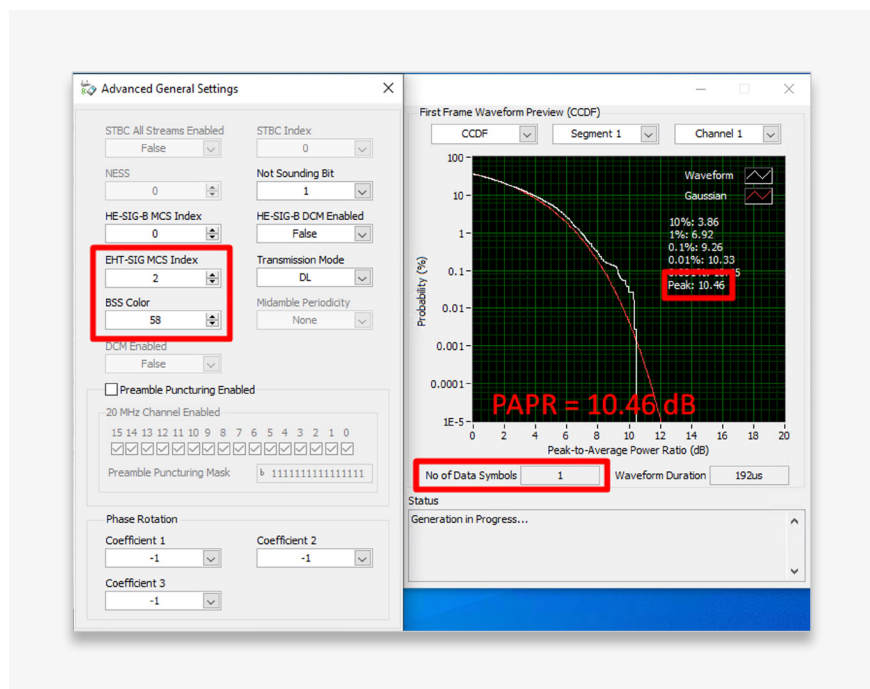


그림 11

EHT-SIG MCS 인덱스를 2로, BSS Color를 58로 설정하여 10.46dB의 PAPR 달성

VST 최적화로 WI-FI 7 테스트에서 최상의 EVM 마진 달성하기

이제 PAPR이 10.46dB이므로 분석기의 참조 레벨을 패킷의 데이터 부분의 피크 샘플에 가깝게 더 낮출 수 있으며, 11be 320MHz를 사용하면 EVM 노이즈 플로어의 EVM은 -49dB가 됩니다(그림 12 참조).

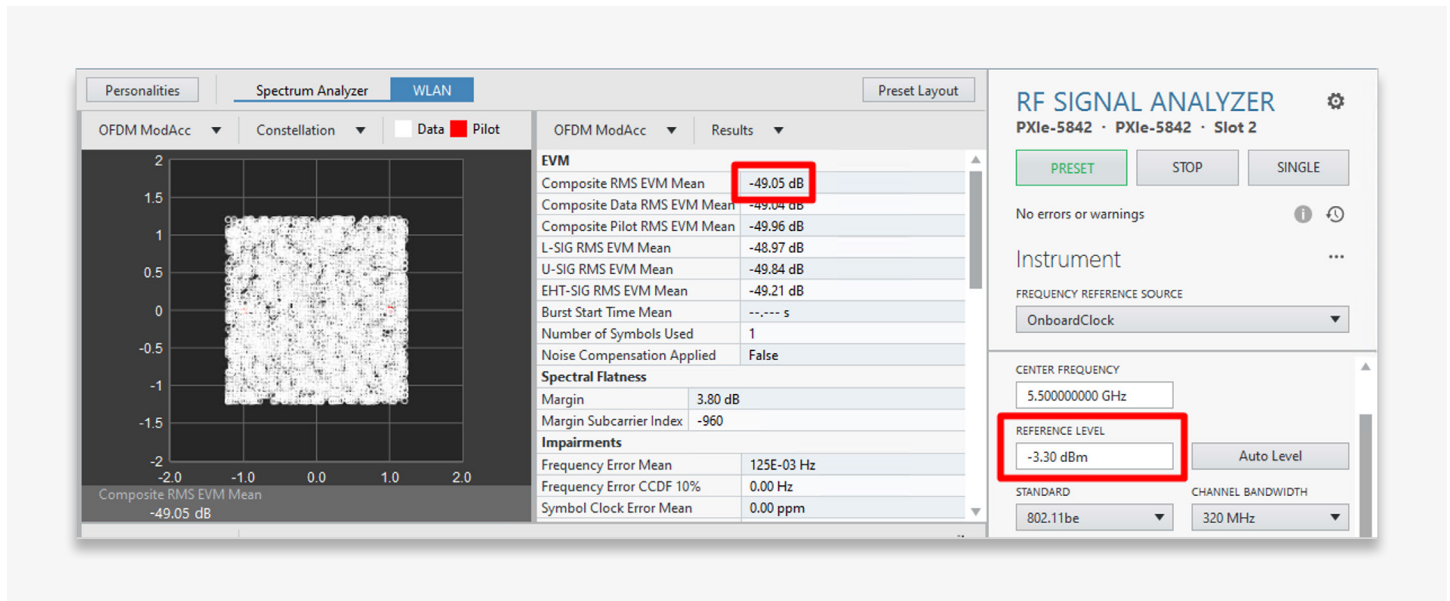


그림 12

VST의 EVM 플로어가 -49.05dB EVM으로 개선

다만 이 방식으로 VST를 테스트하거나 평가할 때 한 가지 문제가 있는데, 바로 PAPR이 단 하나의 WLAN 심볼로 달성되었다는 것입니다(그림 11 참조). 단일 심볼에서는 이러한 종류의 최적화를 찾을 수 있지만 심볼의 수가 증가할수록 가능성은 낮아집니다. 11ax용 IEEE 초안은 최소 16개 심볼에 걸친 변조 정확도 테스트 수행을 요구하며, 11be의 경우 최소 32개 심볼로 업데이트되었습니다.

이런 이유로 정확한 수의 심볼을 사용하여 DUT를 테스트하거나 계측기의 EVM 플로어 성능을 평가하는 것이 더 적절할 것입니다. 요컨대, 적용되는 PAPR 감소 기법은 여전히 동일하지만, 이제는 그림 13처럼 패킷 길이가 32개 심볼로 확장됩니다.

VST 최적화로 WI-FI 7 테스트에서 최상의 EVM 마진 달성하기

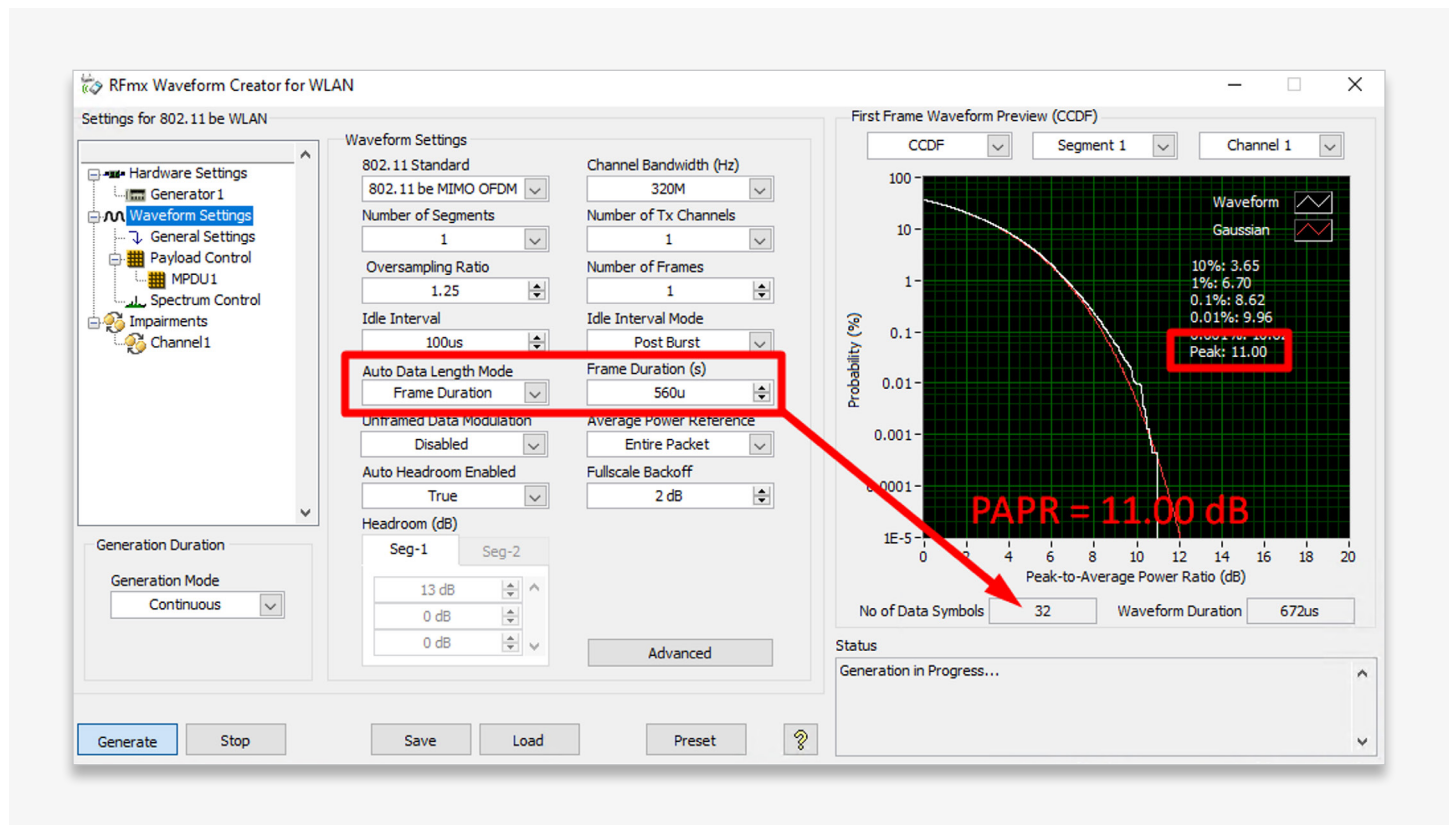


그림 13

프레임 지속기간을 560us로 증가시켜 32개의 심볼을 달성할 경우의 PAPR = 11.00dB

VST 최적화로 WI-FI 7 테스트에서 최상의 EVM 마진 달성하기

따라서 PAPR이 약 0.6dB 증가하면 PXIe-5842의 EVM 플로어 성능이 이전의 -48.24dB EVM보다 약간 더 높아집니다(그림 14와 그림 12 비교).

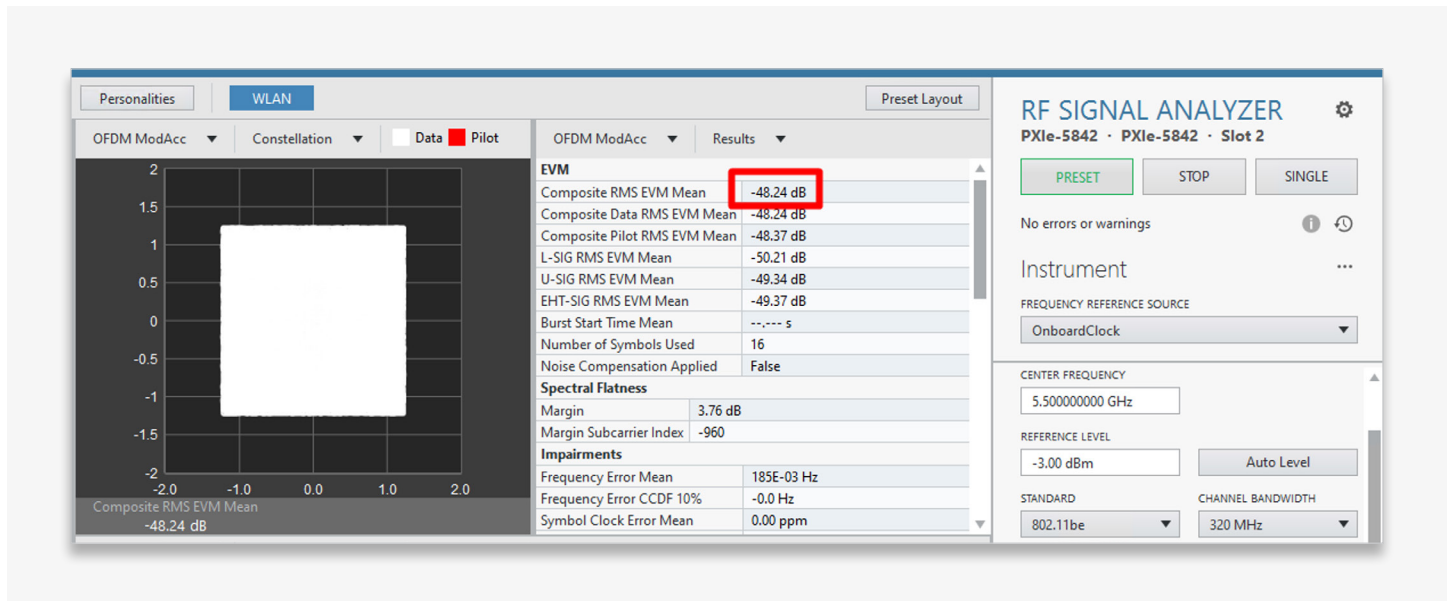


그림 14

32개 심볼로 늘리고 PAPR을 높일 경우 PXIe-5842에서 11be 320MHz MCS 13의 EVM 플로어 -48.24dB

상호 상관을 사용하여 EVM 노이즈 플로어 확장하기

IEEE 규정 준수를 유지하면서 더 큰 EVM 플로어 마진이 필요한 경우, 측정 설정을 2개의 VSA로 확장하여 EVM에 미치는 VSA의 영향을 훨씬 더 줄이는 방법이 있습니다. 그림 15에서 보듯 NI는 외부 분배기를 사용하여 두 개의 서로 다른 분석기 경로에서 생성기 (루프백) 또는 VSG + DUT의 출력을 측정하는 측정 기술의 특허를 취득했습니다.



그림 15

NI 상호 상관을 사용한 상호 상관 EVM 측정 설정을 보여 주는 다이어그램

즉, 벡터가 각 VSA에 수신되거나 상호 상관될 경우, 각 VSA의 상관되지 않은 기여도가 달라지므로 최종 결과에서만 VSA 기여도가 감소합니다. 이를 단일 VSA가 여러 수집을 사용하고 각 반복 사이의 상관되지 않은 노이즈의 평균값 연산을 통해 VSA를 포함한 신호 경로의 모든 것을 줄이는 벡터 평균값 연산(이후 섹션에서 설명)과 혼동하면 안 됩니다.

EVM 상호 상관 어플리케이션 노트 읽기

측정을 위한 추가 진단 기법(IEEE 비준수)

참조 + 데이터 추정

노이즈/왜곡은 주파수에 따라 달라지기 때문에 WLAN의 표준 복조 프로세스에서 채널 전체에 분포된 파일럿 톤은 채널 추정을 위한 것입니다. 한 예로 그림 16에서 볼 수 있듯이 이 11be 20MHz 웨이브폼은 채널의 중심 주파수 주위에 알려진 파일럿 톤의 대칭 분포를 가지고 있으며, 이 분포에서 왜곡 추정과 후속 보정을 가장 가까운 데이터 부반송파 톤에 적용할 수 있습니다. 이러한 파일럿 톤은 IEEE 초안에 따라 분포되며, 리소스 단위(RU) 크기가 선택되는 방식에 따라 달라집니다.

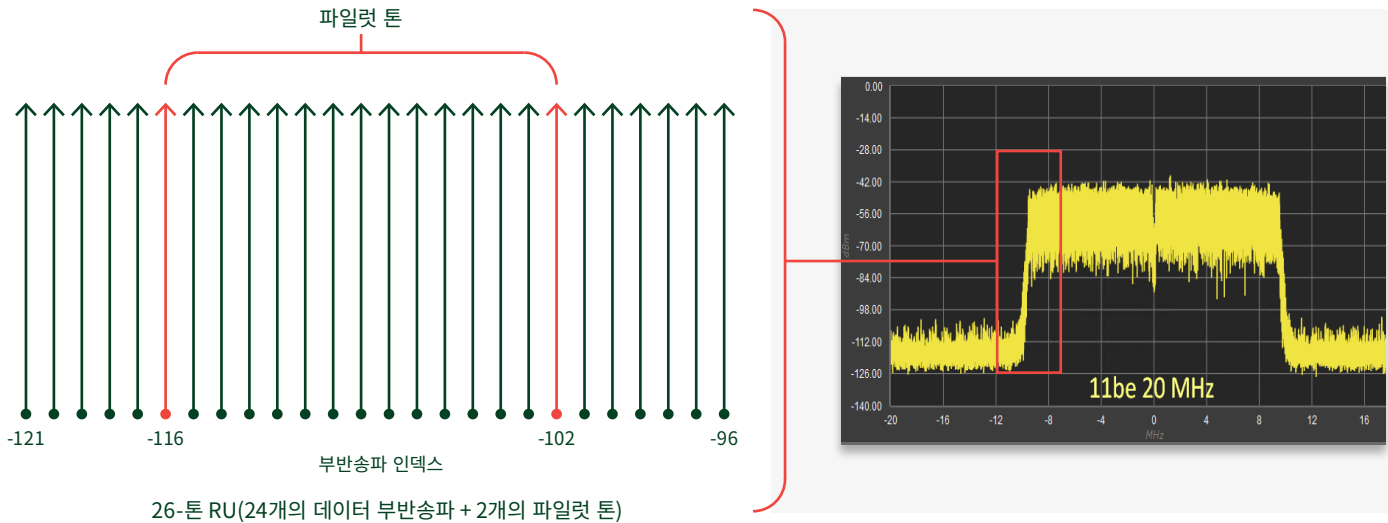


그림 16

26-톤 RU(리소스 단위) 확대를 통해 데이터 부반송파와 파일럿 톤 분포 비교

이것은 IEEE에 따른 수신기 채널 추정 작업에 대한 표준 기대치이지만, 테스트 엔지니어는 성능을 향상시킬 수 있는 다른 채널 추정 방법도 사용할 수 있습니다. 이 방법으로 표준 측정 결과의 신뢰도를 테스트하거나 이러한 기술이 통합된 최종 디바이스 성능을 시뮬레이션할 수 있습니다. 이해해야 할 핵심은 성능 데이터를 비교할 때 동일한 변수 세트를 기반으로 하도록 표준 베이스라인 접근법에서 시작해야 한다는 것입니다.

그림 17에서 보듯 이전에 최적화된 11be 320MHz 신호는 표준 IEEE 참조 채널 추정 타입을 사용하여 -48.24dB EVM의 EVM 플로어로 표시됩니다(그림 18). 이것은 데이터 부반송파의 채널 추정 및 보정을 위해 프리앰블의 파일럿 톤만을 사용한 것입니다.

VST 최적화로 WI-FI 7 테스트에서 최상의 EVM 마진 달성하기

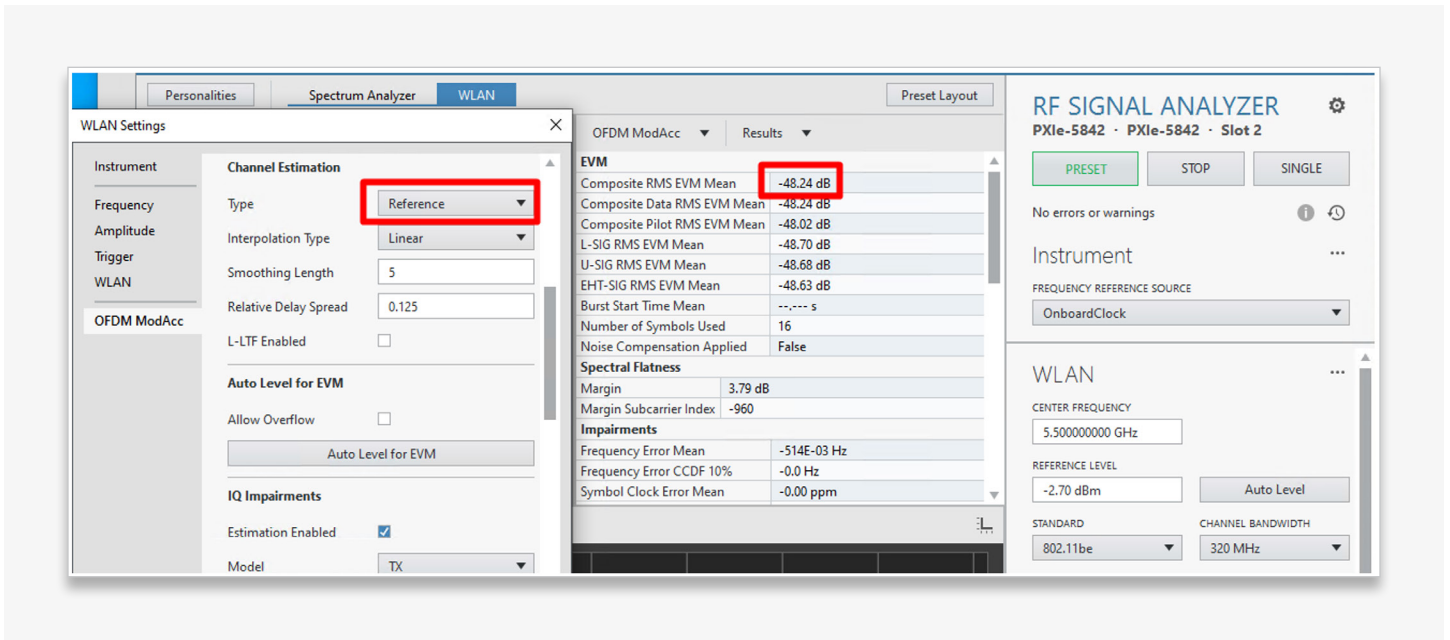


그림 17

표준 참조 채널 추정을 사용한 11be 320MHz 신호의 결과 EVM 플로어

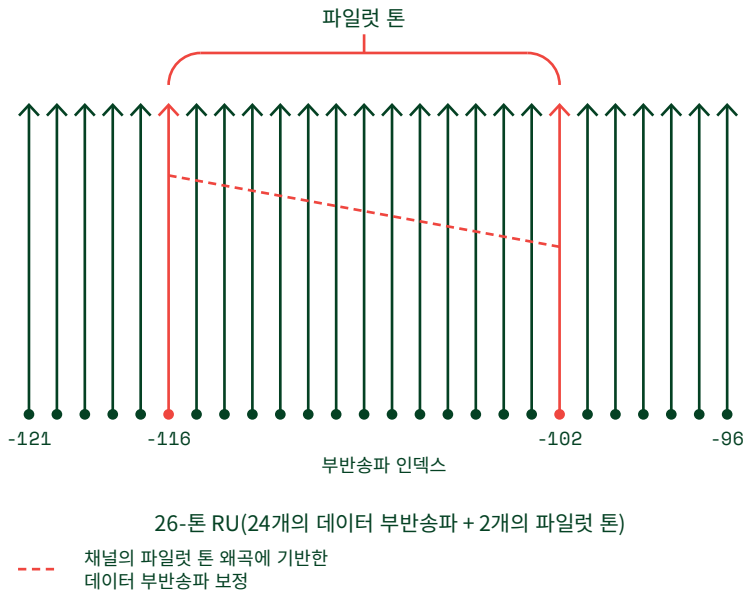


그림 18

IEEE 표준 선형 추정을 적용하여 데이터 부반송파를 보정하는 26-톤 RU의 파일럿 톤

채널 추정에 데이터 부반송파도 사용되는 경우, 이제 스펙트럼에서 더 세밀하게 추정되기 때문에 채널 보정의 정확도를 높일 수 있습니다.

VST 최적화로 WI-FI 7 테스트에서 최상의 EVM 마진 달성하기

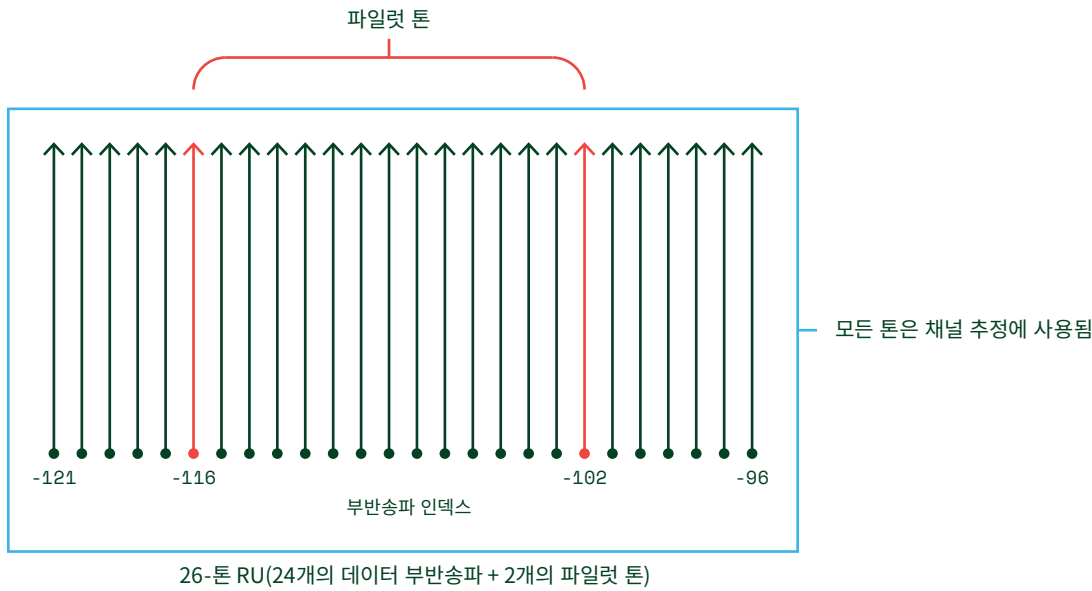


그림 19

채널에서의 왜곡을 추정하는 데 사용되는 26-톤 RU의 파일럿 톤 및 데이터 부반송파(IEEE 표준)

그림 20에서 보듯 각 데이터 부반송파로부터의 추가 추정(여기서 채널 추정 타입 = "참조 및 데이터")은 EVM 플로어를 -51.53dB까지 개선합니다.

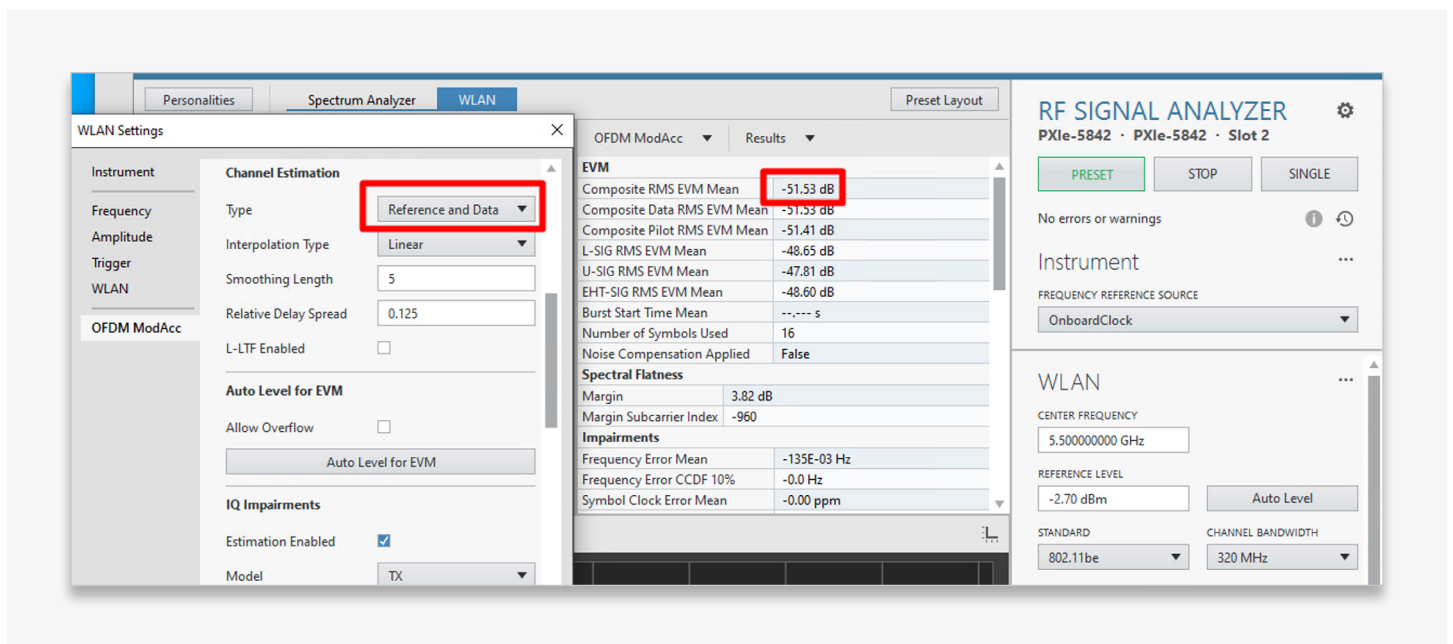


그림 20

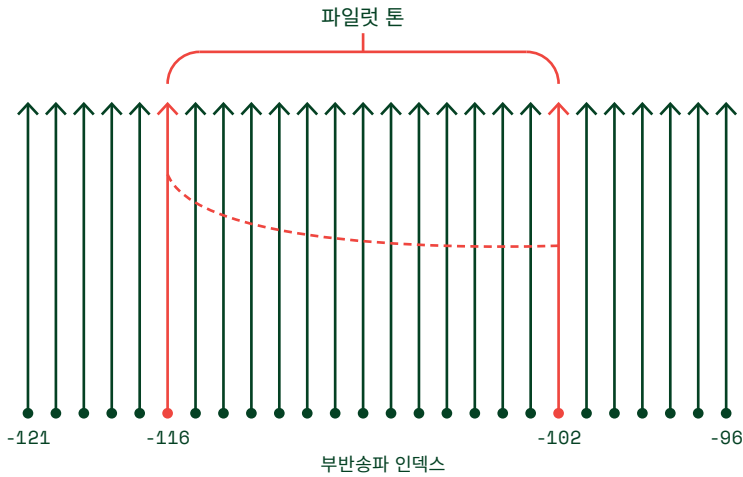
"참조 및 데이터" 채널 추정을 사용한 11be 320MHz 신호의 결과 EVM 플로어

채널 평활화

채널의 각 부반송파 톤의 전체 추정에서 한 걸음 물러나서 보면 여전히 파일럿 톤만을 사용하지만 표준 선형 추정보다 더 많은 통계적 조정을 생성하는 접근법도 있습니다. 이를 채널 평활화라고 합니다(그림 21). 알려진 파일럿 톤 사이에 있는 데이터 부반송파의 왜곡을

VST 최적화로 WI-FI 7 테스트에서 최상의 EVM 마진 달성하기

더 잘 추정하기 위해 여러 보간 필터를 적용할 수 있습니다. 가장 일반적으로 사용되는 것은 삼각 보간과 위너(Wiener) 보간입니다. 그림 22에서 채널 추정에 위너 필터를 적용하면(즉, "채널 평활화" 타입을 켜면) 이 경우에는 EVM 플로어가 -50.45dB EVM으로 개선됨을 알 수 있습니다.



26-톤 RU(24개의 데이터 부반송파 + 2개의 파일럿 톤)

--- 채널의 파일럿 톤 왜곡에 기반한
데이터 부반송파 보정

그림 21

채널 평활화 필터를 적용하여 채널의 왜곡을 추정하는 데 사용되는 26-톤 RU의 파일럿 톤(IEEE 비준수)

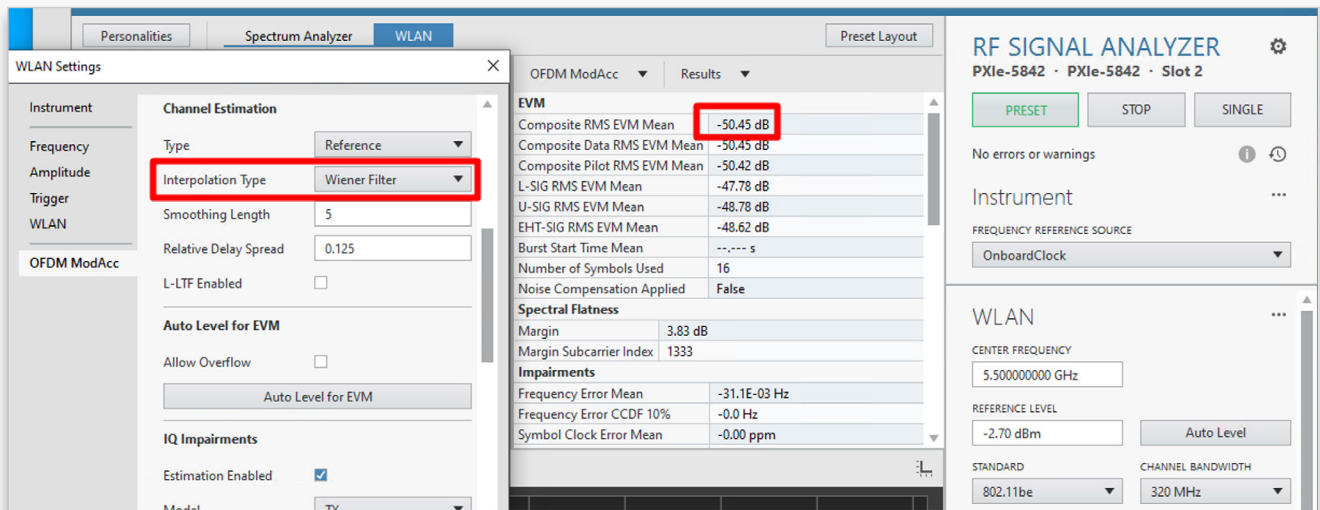


그림 22

위너 채널 평활화를 사용한 11be 320MHz 신호의 결과 EVM 플로어

노이즈 보상

벡터 신호 분석기에 일반적으로 사용되는 또 다른 기술은 VSA의 노이즈 기여도를 최종 측정 결과에서 제거할 수 있도록 해당 WLAN 채널에서 노이즈 플로어를 측정하는 것입니다. IEEE에서 표준 측정 방법으로 정의하지는 않지만 이 기법을 사용하면 DUT에서 측정된 EVM이 실제로 정확하고, 계측기 EVM 플로어의 영향을 받지 않는다는 확신을 높일 수 있습니다. 예상되는 DUT EVM 성능 간 마진이 계측기의 EVM 플로어에 비해 작은 경우, 이 방법이 더 유용할 수 있습니다.

NI 노이즈 보상에 대한 추가 세부사항

벡터 평균값 연산

앞에서 설명한 상호 상관과 달리 벡터 평균값 연산은 단일 VSA 채널만 사용하고 여러 수집의 평균을 내어 신호 경로에서 상관되지 않은 모든 노이즈를 줄이는 기법입니다. 2개의 VSA 채널을 사용하는 상호 상관을 사용하여 채널 사이의 상관되지 않은 노이즈를 줄이면 생성기(VSG)와 DUT의 기여도만 드러나지만 벡터 평균값 연산은 한 반복에서 다음 반복까지 상관되지 않은 노이즈를 감소시킵니다. 이는 실제 DUT EVM이 가려질 때까지 VSA뿐만 아니라 모든 EVM 기여도가 각 반복마다 감소한다는 것을 의미합니다.

벡터 평균값 연산에 대한 추가 정보

결론

정리하면 IEEE를 준수하는 여러 최적화와 진단용으로만 유용한 일부 최적화를 논의했습니다. 벡터 신호 트랜시버와 같은 계측기의 EVM 노이즈 플로어를 평가할 때 DUT 측정에 적절한 마진을 제공하려면 다음을 수행하는 것이 좋습니다.

- 표준을 준수하지만 PAPR에서 가능한 낮은 테스트 웨이브폼을 사용합니다.
- VSG에서 VSA로 로컬 오실레이터를 공유하여 PA 테스트에서 위상 노이즈 기여도를 제거합니다. 트랜시버의 경우, 저위상 노이즈 LO를 사용하여 DUT의 IF/RF 포트를 구동해야 합니다.
- DUT 전후의 신호 경로를 특성화하고 계획하여 임피던스 매칭 또는 DUT의 더 높은 전력 출력 사이에서 최상의 절충이 이루어지도록 하는 동시에 신호 체인을 통해 양호한 SNR을 유지합니다.
- 신호 분석기의 참조 레벨을 최적화하여 (프리앰블로 인해) ADC에 과부하가 걸리기 전에 WLAN 패킷의 데이터 부분의 피크 샘플에 최대한 가깝게 만듭니다.
- EVM 플로어 마진이 예상 DUT EVM 성능에 너무 가까우면 다음을 순서대로 고려하십시오.
 - 노이즈 보상이 적용된 측정과 비교하여 DUT EVM을 확인하여 수치의 상관 관계를 확인합니다. 상관 관계가 없다면 VST 기여도가 잠재적으로 실제 결과를 마스킹하고 있는 것입니다.
 - NI 상호 상관 솔루션을 활용하여 EVM 노이즈 플로어를 확장하는 것을 고려하십시오.
 - 동급 최고의 EVM 성능을 얻으려면 최신 PXIe-5842로 업그레이드하는 것을 고려하십시오.

Wi-Fi 7 및 무선 연결 테스트에 대해 자세히 알아보기