

오실로스코프를 사용하여 RF 테스트

오실로스코프가 RF 실험실에서 환영받을 수 있을까요?

무선 주파수(RF) 커뮤니티의 기본적인 통념에 따르면 무선 송신기(Tx) 측정 시에는 신호 분석기를 사용하는 것이 좋습니다.

하지만 한 가지 문제가 있습니다.

현재 개발 중인 다수의 밀리미터파(mmWave) 기술이 신호 분석기가 직접 측정할 수 있는 범위보다 높은 대역폭에서 작동합니다. 또한 최근 급부상하고 있는 MIMO(다중 입력/다중 출력) 기술도 위상 코히어런트 및 멀티채널 분석을 필요로 합니다. 따라서 테스트 전략 및 방법에 변화가 필요합니다. 전 세계 모든 RF 엔지니어의 혼란을 초래하는 이 상황에서, 오실로스코프는 필수 RF 테스트 툴로 거듭날 준비를 마쳤습니다.

새롭게 등장하는 무선 mmWave 기술을 테스트하려면 다음 세 가지 특성을 갖춘 벤치 장비가 필요합니다.

- 신호의 물리적인 특성 캡처와 분석이 가능한 **높은 입력 주파수 범위와 넓은 분석 대역폭**
- 오류 벡터 크기(EVM), 스퓨리어스 없는 동적 범위 등 **뛰어난 신호 무결성** 사양
- MIMO 시스템을 처리할 수 있도록 **긴밀한 시간 상호연관성을 지닌 다채널**

이러한 테스트 요구사항과 관련해 차세대 오실로스코프 플랫폼이 어떻게 신호 분석기를 보완할 수 있을까요? 세 가지 고려사항을 각각 살펴보면서 그 방법을 알아보겠습니다.



그림 1. 오실로스코프를 사용한 5G NR 캡처

고주파수 및 넓은 분석 대역폭 측정

일반적으로 무선 기술은 작은 대역폭 범위 내에서 작동합니다. 2 GHz 이상의 변조 대역폭을 분석해야 하는 상황이 점점 더 많아지고 있으며, 10 – 20 GHz의 대역폭에 대한 요구도 점차 증가하고 있습니다. 5G NR 및 WiGig와 같은 차세대 송신기 테스트를 예로 들어보겠습니다.

- 5G 테스트에는 약 5 GHz의 분석 대역폭이 필요합니다.
- 802.11ad와 802.11ay의 경우 각각 2.16 GHz와 4.32 GHz 너비의 채널을 가지며, 추후 6.48 GHz와 8.64 GHz 너비까지 지원할 예정입니다.

오래전부터 이러한 작업에 신호 분석기를 사용해 왔는데, 일반적으로 1 GHz 이하의 분석 대역폭 제한이 있습니다. 이러한 기술을 테스트하기 위해서는 설계자와 테스터가 믹서, 다운 컨버전 등을 사용하는 굉장히 복잡한 신호 분석기의 설정을 필요로 합니다. 측정 정확도를 개선하고 설정 복잡성을 줄이면서 설계 일정이 순조롭게 진행될 수 있게 하려면 추가적인 mmWave 측정 옵션을 활용해 보십시오.

분석 대역폭 및 주파수 범위

고주파, 넓은 대역폭 측정 시, 가장 먼저 고려해야 할 사항은 계측기의 대역폭입니다. 여기에는 분석 대역폭과 주파수 범위가 포함됩니다. 분석 대역폭이란 계측기가 한 번의 수집에서 분석할 수 있는 주파수 범위를 의미합니다. 주파수 범위는 지정된 계측기에 대해 유효한 입력 주파수의 총 범위를 말합니다. 이제 오실로스코프가 어떻게 발전해 왔고, RF 설계자가 설계에 대한 통찰력을 얻는 데 있어 오실로스코프가 어떻게 도움이 될 수 있는지 살펴보겠습니다.



넓은 대역폭 측정이 정말 필요할까요?

최근 미국 연방통신위원회에서는 100 GHz 미만 스펙트럼의 서막이 올랐으며 더 높은 주파수의 기술을 개발하기 위한 경쟁이 시작되었다고 발표했습니다. 극도로 높은 주파수를 사용하는 새로운 기술은 다음과 같습니다.

- 특정 5G NR(New Radio) 대역 (> 24 GHz, > 50 GHz)
- 일부 오토모티브 레이더 시스템(> 70 GHz)
- 802.11ad 및 802.11ay (50 – 70 GHz)
- 위성 통신(> 70 GHz)
- 6G 개발(> 100 GHz)

이러한 신기술을 테스트하려면 장비가 신호를 수집하고 분석할 수 있어야 합니다. 고주파수 측정 및 방법론에 대한 요구가 날로 증가하고 있습니다.



그림 2. PAM4 신호를 표시하고 있는 키사이트 UXR-시리즈 오실로스코프

오실로스코프 VS 신호 분석기 – 분석 대역폭

오늘날의 오실로스코프 모델은 50 MHz의 저사양부터 고사양인 110 GHz까지 폭넓은 범위를 지원합니다. 또한 실시간 분석 대역폭을 제공하므로 DC부터 구매한 대역폭까지 측정이 가능합니다. 반면 신호 분석기는 수 Hz에서 110 GHz까지의 주파수 분석을 지원합니다. 오늘날 RF 신호 분석기의 일반적인 측정 범위는 25 MHz ~ 2 GHz입니다. 신호 분석기에서는 이러한 한계를 넘어서기 위해 주로 다운 컨버터와 외부 디바이스를 사용하지만, 그렇다고 해도 약 5 GHz의 분석 대역폭이 한계입니다. 디바이스와 케이블을 추가하는 것의 단점은 설정 시간과 고정의 복잡성이 증가해 신호 무결성이 영향을 받는다는 점입니다. 그림 3의 EVM 측정 결과를 참조하십시오.

오실로스코프 VS 신호 분석기 – 주파수 범위

오래전부터 신호 분석기를 RF 테스트에 널리 사용해 온 이유는 고주파수에서 저노이즈 측정이 가능하기 때문입니다. 신호 분석기를 사용하면 합리적인 가격으로 매우 높은 주파수 범위를 측정할 수 있습니다.

신호 분석기와 입력 주파수 범위가 동일한 고사양 오실로스코프도 있으나 보통 그러한 제품은 가격이 훨씬 더 비쌉니다. 일부 주파수 범위에서는 오실로스코프가 신호 분석기보다 10배나 비쌀 수도 있습니다.

그러나 다수의 신호 분석기는 분석 대역폭이 1 GHz 수준에 그칩니다. 이 정도의 분석 대역폭으로는 새롭게 부상하고 있는 mmWave 기술에 사용되는 주파수를 감당하기 어렵습니다.

오실로스코프 VS 신호 분석기 – 노이즈 및 성능

이론상으로는 오실로스코프가 여러 상황에서 신호 분석기를 대체할 수 있지만, 신호 분석기의 이점 역시 고려하는 것이 중요합니다. 입력 주파수와 대역폭이 낮은 경우에는 상대적으로 비용이 중요해 보입니다. 그러나 대역폭이 넓어지고 주파수가 높아짐에 따라 비용 또한 바뀌기 시작합니다.

또한 신호 분석기는 다수의 기술을 쉽게 검증하고 디버깅할 수 있는 RF 테스트 제품군과 함께 제공됩니다. 오실로스코프는 예전부터 고속 디지털 측정, 디버깅, 그리고 DDR, PCI Express, USB와 같은 컴플라이언스 어플리케이션에 초점을 맞춰 왔습니다.

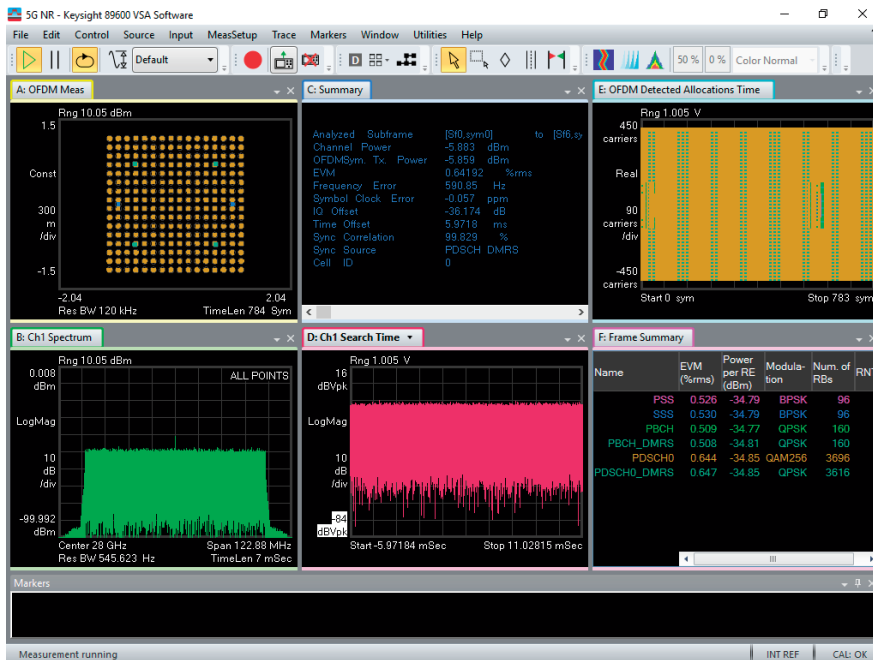
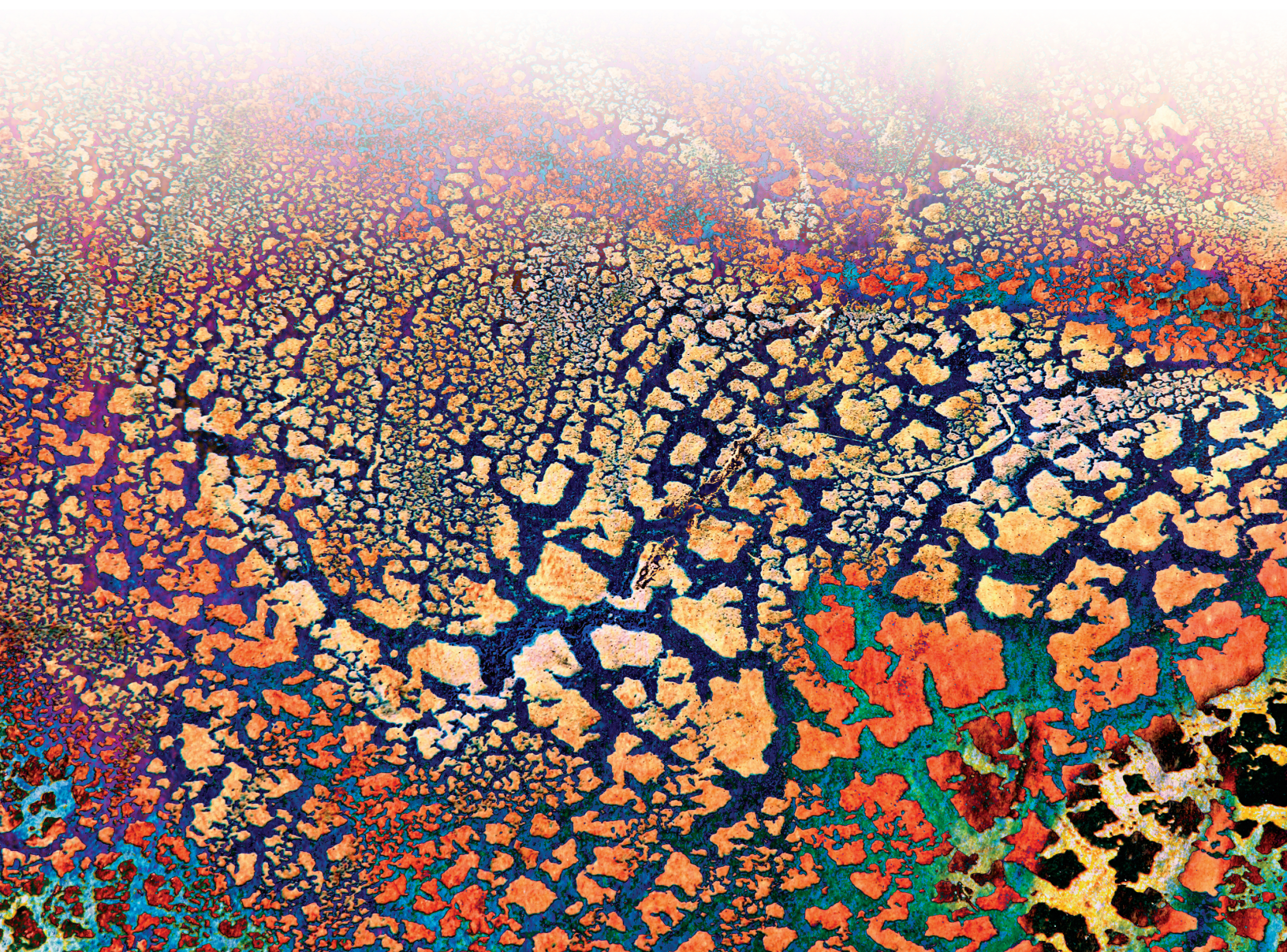


그림 3. VSA 및 키사이트 UXR-시리즈 오실로스코프를 사용한 28 GHz 5G NR 신호 캡처 (EVM이 0.64%밖에 되지 않는다는 점에 주목하십시오.)

그리고 스코프만으로 모든 것이 해결되지는 않습니다. 고사양 오실로스코프는 새로운 기술을 테스트하는데 필요한 주파수에 도달할 수 있지만, 종종 mmWave 대역폭에서의 올바른 RF 테스트에 방해가 되는 설계 문제를 유발하곤 합니다.

예를 들어, 다수의 광대역폭 오실로스코프에 사용되는 기존의 인터리빙 기법은 노이즈가 지나치게 많은 RF 측정을 유발합니다. 따라서 직접적인 디지털화가 가지는 노이즈 관련 이점을 잃게 됩니다.

RF 측정에 적합한 노이즈 성능과 신호 무결성을 갖는 오실로스코프를 선택하는 것이 매우 중요합니다. 이렇게 오실로스코프의 설계 문제와 그러한 문제가 mmWave 측정에 미치는 영향, 그리고 이러한 문제를 해결하는 방법에 대해 자세히 알아보고 싶다면 계속해서 읽어주십시오. 아니면 "다중 채널 및 MIMO 측정" 섹션으로 건너뛰어 다채널 측정과 관련해 신호 분석기와 오실로스코프를 비교한 내용을 확인할 수도 있습니다.



매우 높은 오실로스코프 대역폭의 숨겨진 비용

몇몇 스코프 제조업체는 자사의 고사양 오실로스코프가 70 GHz 및 100 GHz의 대역폭에 도달한다고 주장하지만, 실제로는 다양한 주파수 혼합 기법을 사용해 높은 대역폭을 얻는 것입니다.

디지털 대역폭 인터리빙

한 벤더는 2000년대 중반 실시간 오실로스코프의 시초가 된 기법인 디지털 대역폭 인터리빙(DBI)을 사용합니다. DBI는 일종의 하이브리드 필터 बैं킹으로, 오실로스코프 제조업체들이 주파수를 인터리빙하기 위해 사용하는 방법 중 하나입니다. 인터리빙 기법의 이점은 오실로스코프의 전치증폭기가 전체 대역폭이 아니어도 된다는 점입니다. 따라서 굉장히 높은 대역폭을 얻을 수 있을 정도로 충분히 빠른 트랜지스터 기술을 보다 쉽게 찾을 수 있습니다.

예를 들어, 대역폭 사양이 60 GHz이지만 전치증폭기 사양은 30 GHz에 불과한 오실로스코프가 있다고 가정해 보겠습니다. 필요한 트랜지스터 기술은 약 150 GHz 정도이면 되는데, 이는 꽤 일반적인 속도입니다.

이 구성이 원활하게 작동할 수 있도록 오실로스코프는 60 GHz의 신호를 다이플렉서를 통해 두 개의 30 GHz 신호로 나눕니다. 이 프로세스는 0 - 30 GHz(낮은 대역폭) 신호와 30 - 60 GHz(높은 대역폭) 신호를 만들어냅니다. 그런 다음 높은 대역폭의 신호가 다운 컨버팅되고 두 신호가 30 GHz 오실로스코프 프론트 엔드를 통과합니다. 이후 신호가 디지털화와 업컨버팅, 재결합을 거쳐 하나의 60 GHz 신호를 제공합니다.

업컨버팅과 재결합은 전반적인 신호 노이즈를 크게 높입니다. 즉, 60 GHz에 도달할 수는 있으나 노이즈 문제가 더 커지게 됩니다(그림 4 참조).

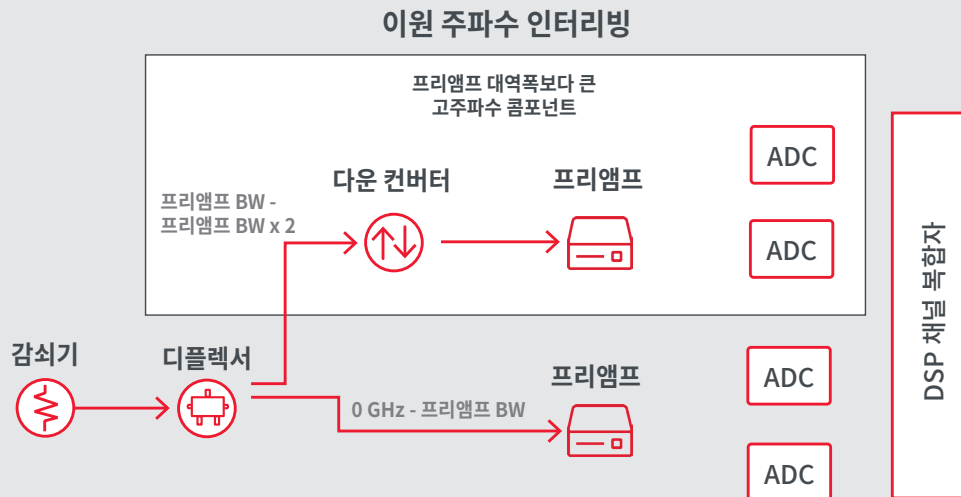


그림 4. 과거에 오실로스코프가 30 GHz보다 큰 대역폭을 달성했던 방법을 보여주는 예시

DSP 부스팅

굉장히 높은 대역폭을 달성하기 위한 또 다른 기법은 DSP 부스팅인데, 이 기법에서는 오실로스코프의 고주파 콤포넌트를 증폭시키고 대역폭을 최대 20%까지 높일 수 있는 디지털 필터를 적용합니다. 이 기법의 이점은 보다 높은 대역폭에 도달할 수 있다는 것이며, 단점은 신호 무결성이 상당히 떨어지게 된다는 점입니다. **DSP 부스팅은 측정값에 노이즈를 주입합니다.** 추가된 노이즈가 문제가 되는 이유는 오늘날 새롭게 등장하는 기술들은 굉장히 민감하기 때문인데, 이러한 노이즈 증가로 인해 오실로스코프를 mmWave 측정 툴로 활용할 수 없게 됩니다.

인터리빙 구조 방지

노이즈 증가의 명확한 해결책은 오실로스코프에 전체 대역폭의 전치증폭기와 샘플 채집기를 탑재하는 것입니다. 그러나 현재로서는 대역폭이 매우 큰 부품을 구하기가 어렵습니다. 현존하는 유일한 고사양 전체 대역폭 전치증폭기 및 샘플 채집기는 **키사이트 UXR-시리즈** 오실로스코프의 독점 인화 인덱스 ASIC입니다. 이 ASIC은 DSP 부스팅, 인터리빙 또는 다른 대역폭 개선 없이도 최대 110 GHz까지 지원합니다(그림 5).

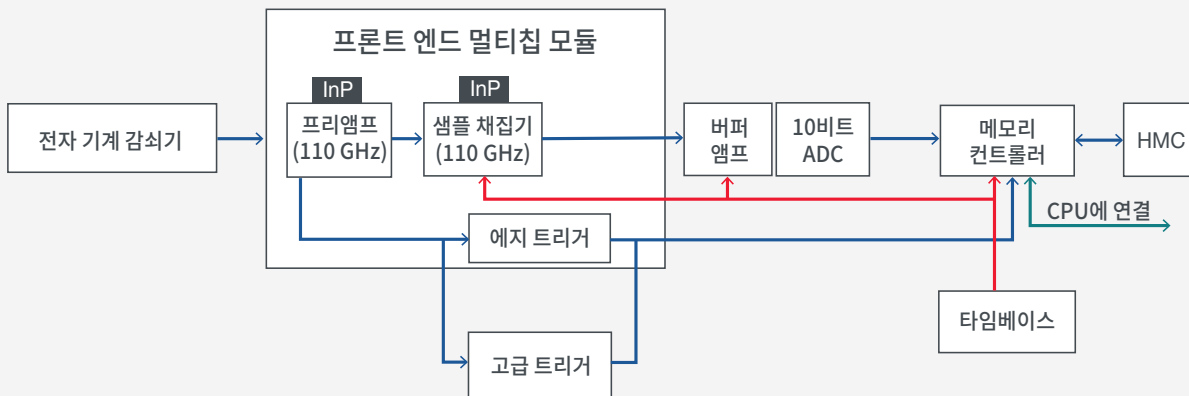


그림 5. 키사이트의 UXR 오실로스코프가 110 GHz를 달성하는 방법

오실로스코프 VS 신호 분석기 – 신호 무결성

신호 분석기는 RF 측정 분야에서 최고로 손꼽힙니다. 또한 EVM, 스퓨리어스 없는 동적 범위, 디스플레이 평균 노이즈 레벨(DANL), 유효 비트 수와 같은 RF 중심 사양에서 보다 우수한 것으로 알려져 있습니다.

그렇다면 기존 RF 사양과 관련해 오실로스코프가 신호 분석기의 성능을 따라잡거나 더 나아가 넘어설 수는 없을까요? 놀랍게도, 그런 일이 가능합니다.

설계자들이 끊임없이 오실로스코프의 대역폭을 늘려온 결과, 마침내 신호 분석기에서만 지원 가능했던 주파수에 도달하게 되었습니다.

이 때문에 스코프 설계자들은 설계에서 RF 중심 사양을 보다 진지하게 받아들이기 시작했습니다.

예를 들어, 그림 6과 7은 두 세대의 오실로스코프에 대한 노이즈 밀도 플롯을 보여줍니다. 그림 6이 이전 모델이고, 그림 7이 신규 모델입니다. 자세히 살펴보면 새 스코프의 노이즈 밀도가 이전 스코프에 비해 8 dB/Hz 이상 더 우수하다는 것을 알 수 있습니다.



그림 6: 8비트 키사이트 오실로스코프의 노이즈 밀도 플롯, 주파수 인터리빙 사용



그림 7: 키사이트 UXR-시리즈 오실로스코프 노이즈 밀도 플롯, 10비트 ADC, 주파수 인터리빙 없음

오실로스코프 VS 신호 분석기 - RF 중심 사양

사양만 비교해 보았을 때, 오실로스코프는 신호 분석기와 얼마나 차이가 날까요? 두 개의 대표적인 테스트 장비 제품인 키사이트 UXA X-시리즈 신호 분석기와 키사이트 Infiniium UXR-시리즈 오실로스코프의 사양을 비교해 보겠습니다(표 1).

표 1. 성능 사양 — 키사이트 UXR-시리즈 오실로스코프 및 키사이트 UXA-시리즈 신호 분석기

사양*	오실로스코프(UXR)**	신호 분석기(UXA)
최대 주파수 범위	DC – 110 GHz	2 Hz – 110 GHz
DANL / 노이즈 플로어	(-18 dBm 범위) 25 GHz: -159 dBm/Hz 50 GHz: -157 dBm/Hz 75 GHz: -156 dBm/Hz	(가장 낮은 범위) 25 GHz: -146 dBm/Hz 50 GHz: -138 dBm/Hz 75 GHz: -148 dBm/Hz
TOI(Third order intercept)	(6 dBm 범위) 3.65 GHz: +22 dBm 26.5 GHz: +18 dBm	지정된 값: 1 GHz: +20 dBm (6 dBm 범위) 3.65 GHz: +25 dBm 26.5 GHz: +25 dBm
위상 노이즈 (1 GHz)	10 kHz 오프셋: -124dBc/ Hz 측정 100 kHz 오프셋: -137dBc/ Hz 측정 100 kHz 오프셋, 2개 채널 x-보정: -147dBc/Hz	10 kHz 오프셋: -135dBc/ Hz 공칭 100 kHz 오프셋: -139dBc/ Hz 공칭
잔여 EVM (100 MHz 5GNR, 39 GHz)	0.8%	0.7%
다이내믹 레인지	103 dB	114 dB

*이 표의 모든 측정 사양은 키사이트 R&D에서 측정한 내용을 따랐으며 보증된 사양이 아닙니다.

** mmWave 확장 옵션 및 VSA 포함 110 GHz UXR

표 1에서 보시다시피, 일반적으로 신호 분석기의 중요한 사양 부분에서 오실로스코프가 크게 뒤지지 않습니다. 여전히 신호 분석기가 여러 영역에서 좀 더 뛰어나지만, 몇몇 사양의 경우 오실로스코프의 성능이 더 뛰어나고 다른 부문에서도 수치가 나름 준수합니다.

따라서 오실로스코프를 RF 테스트 툴로 사용하면 안 되는 이유로 사양을 들기에는 근거가 부족합니다.

다중 채널 및 MIMO 측정

무선 통신업체들이 5G 인프라를 개발 및 구축함에 따라 5G 속도를 달성할 수 있는 최고의 방법으로 크기는 더 작고 밀도는 더 높은 셀이 꿈이고 있습니다. 이러한 셀은 중단 없이 원활하게 고객 데이터를 전송하기 위해 MIMO 및 빔포밍과 같은 기술을 사용합니다(그림 8 및 9). 미래에는 채널 밀도가 최대 64개 채널까지 확장될 수 있습니다. 이러한 유형의 시스템을 측정하려면 테스트 장비가 굉장히 조밀한 시간 정렬 기능과 함께 다중채널 역량을 갖추거나 단일 채널과 복잡한 테스트 구조를 활용해야 합니다.

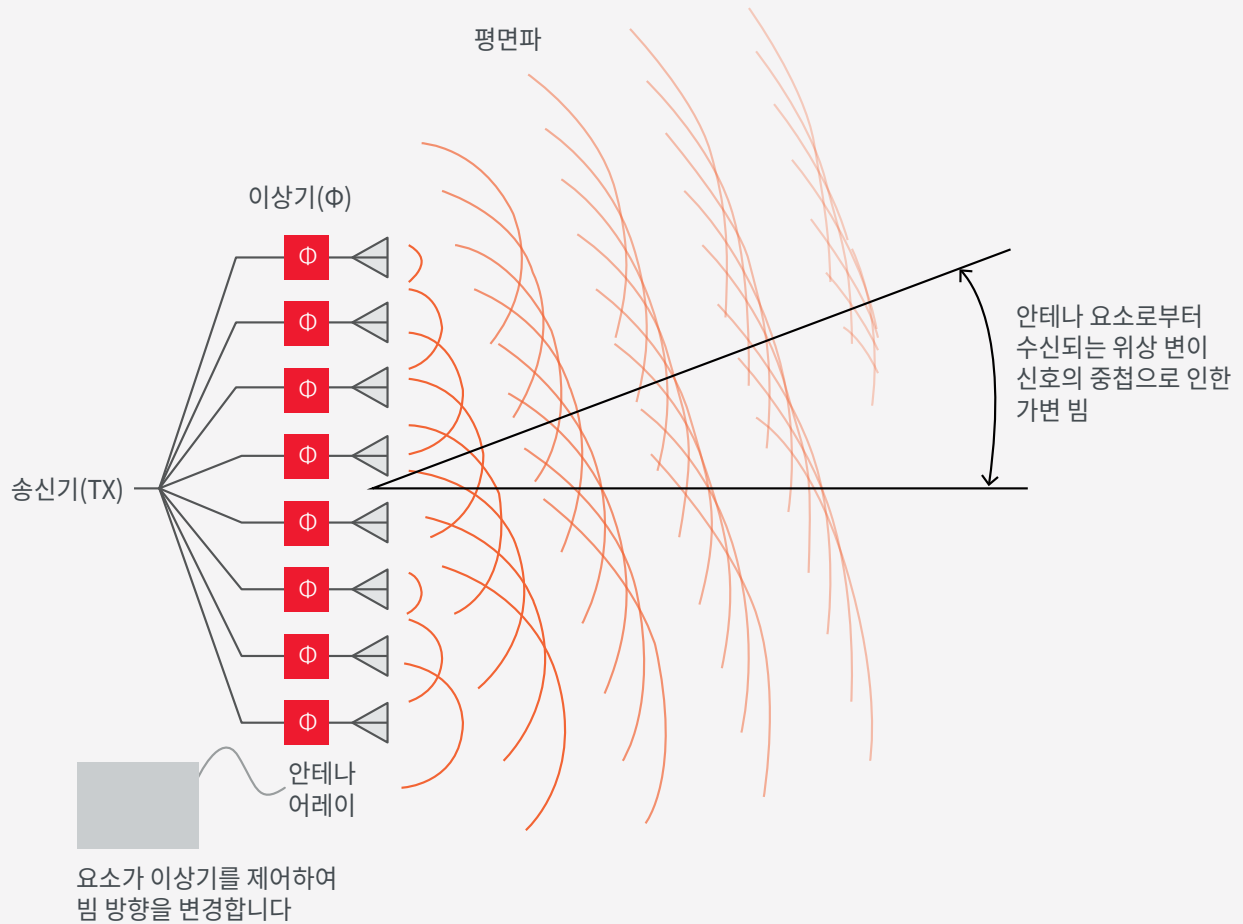


그림 8: 위상 어레이의 기본 작동

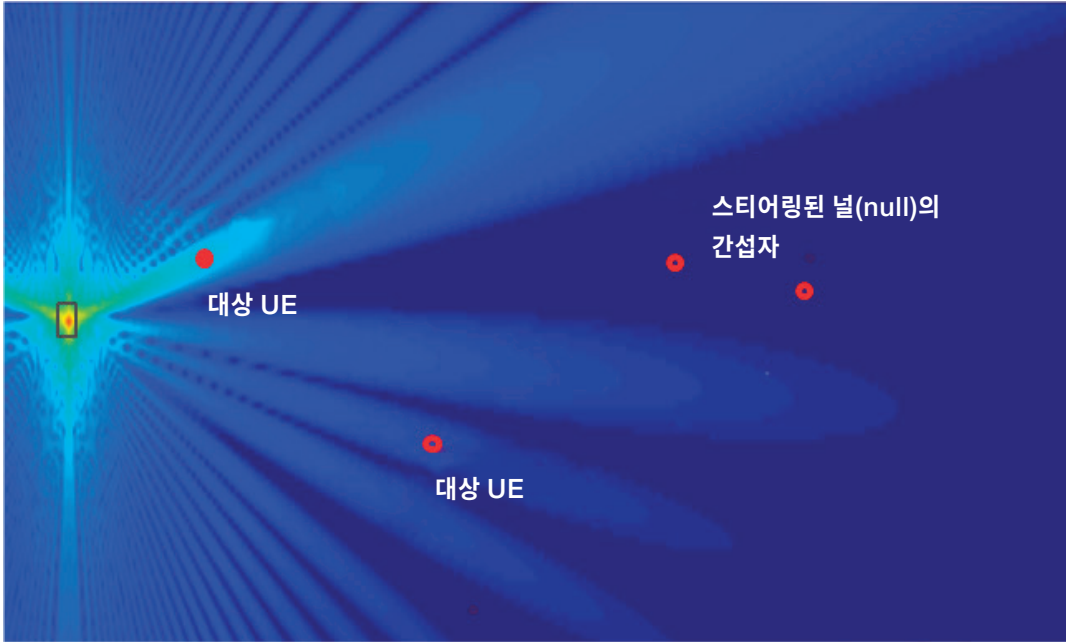


그림 9: 2D 시간 도메인 듀플렉스 전파 시뮬레이션, 50개 요소 선형 어레이 기준. 각 빔이 대상 사용자 장비(UE)로 스티어링되고 널(null)은 다른 UE 및 인터페이스 소스를 향해 스티어링됩니다.

오실로스코프 VS 신호 분석기 - 다중 채널 측정

올바른 MIMO Tx 테스트를 위해서는 여러 채널을 한 번에 측정하고 시간 정렬이 굉장히 조밀해야 합니다. 신호 분석기로 이러한 채널을 측정할 경우 일반적으로 채널당 하나의 분석기를 사용하고 시간을 상호연관시켜야 합니다. 이 프로세스는 비용이 매우 빠르게 증가할 수 있지만 이러한 mmWave 측정 유형에 대한 산업 표준입니다.

그러나 최근 기술 발전으로 인해 다중 채널 분석이 가능해졌으며, 최대 네 개의 위상 코히어런트 분석 채널을 제공하므로 진정한 다중채널 분석에 적합합니다.

일반적으로 오실로스코프는 두 개 또는 네 개의 채널을 가지며 채널 대 채널 위상 간섭성이 뛰어납니다. 또한 시간축을 통해 설계상 위상이 조밀하게 고정된 신호를 캡처할 수 있습니다. 예를 들어, 키사이트 UXR-시리즈 오실로스코프는 채널 대 채널 지터가 20 fs입니다. 이를 다른 UXR과 결합하여 스코프 내부 지터를 50 fs 미만으로 낮출 수 있습니다.

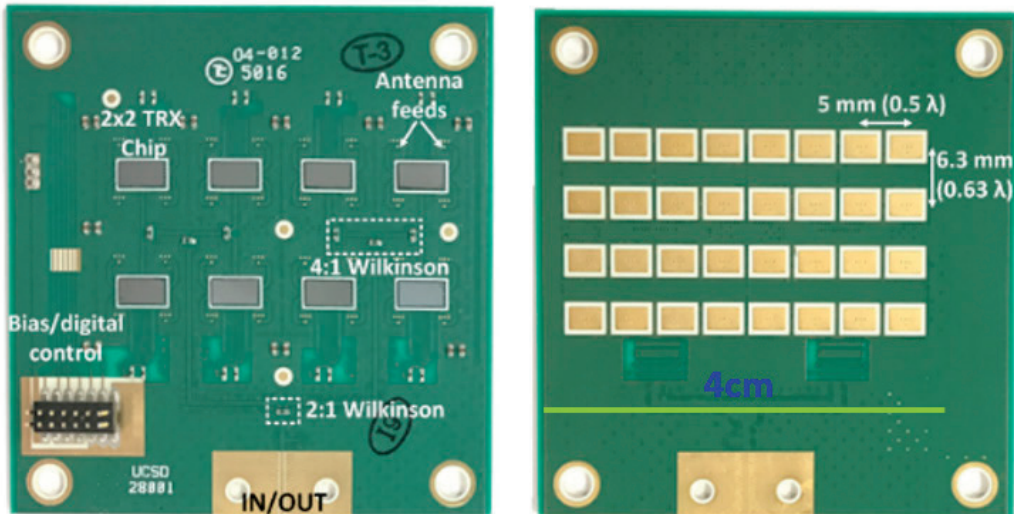


그림 10: 28 GHz RFIC와 안테나 어레이 간의 높은 통합 수준을 보여주는 회로 보드의 두 측면.
 이미지 제공: 샌디에이고 캘리포니아 대학교의 G. Rebeiz 교수

최신식 오실로스코프의 대역폭, 입력 주파수, 신호 무결성, 위상 간섭성, 다중채널 역량을 보면 mmWave 테스트 툴로 사용하기에 손색이 없습니다.

오실로스코프 VS 신호 분석기 - 비용

2채널을 기준으로 110 GHz 오실로스코프의 비용은 100만 달러를 웃돕니다. 4채널로 가는 경우 비용은 150만 달러를 가뿐히 뛰어넘습니다. 유사한 사양을 가진 신호 분석기의 경우 비용이 훨씬 더 저렴해, 보편적인 Tx 테스트 툴의 자리를 지키고 있습니다.

하지만 이것으로 끝이 아닙니다.

오실로스코프 제조업체들이 스코프의 핵심 기능을 바꾸고 있습니다. DC에서 고주파로 가는 대신, 오실로스코프가 0 Hz ~ 110 GHz 사이의 사용자 정의 주파수 범위를 캡처할 수 있게 해주는 새로운 필터 기능을 개발하기 시작했습니다. 이러한 기능을 활용하여 스코프는 넓은 스펙트럼 노이즈를 제거하고 신호 분석기와 좀 더 흡사하게 작동할 수 있습니다. 또한 고주파 신호를 측정하기 위해 110 GHz 오실로스코프의 비용을 지불할 필요가 없어집니다.

예를 들어, 가격이 110 GHz 모델의 25% 미만인 25 GHz UXR 오실로스코프를 구매한 다음, 최대 110 GHz를 지원하는 RF 분석 기능을 갖추면 됩니다. UXR-시리즈의 mmWave 확장 옵션을 통해 25 GHz 스코프에 사용자 정의 가능한 5 GHz 또는 10 GHz 분석 대역폭을 갖춰 1 GHz ~ 110 GHz의 입력 주파수를 확보할 수 있습니다.

이러한 방법을 통해 오실로스코프의 가격을 성능이 유사한 오실로스코프 구매가의 1/3로 줄이고, 동급 신호 분석기와 동등한 사양을 확보할 수 있습니다. mmWave 주파수를 테스트할 수 있는 RF 톨과 25 GHz 오실로스코프를 모두 갖추게 됩니다. 차세대 무선 칩셋이 한쪽에는 디지털 입력을, 다른 쪽에는 RF 입력을 갖추고 있어 스코프를 전에 없이 유용하게 활용할 수 있게 되었습니다. 오실로스코프를 통해 이러한 설계의 양 측면을 일관성 있게 측정할 수 있습니다.



그림 11. 키사이트 E7515B UXM 5G 무선 테스트 플랫폼

새로운 테스트 툴을 필요로 하는 mmWave 주파수

다양한 기술을 갖춘 신호 분석기는 RF 테스트에 널리 사용되는 툴로 자리를 잡았습니다. 노이즈 성능, 기술별 측정 어플리케이션, 비용 등의 모든 요소가 신호 분석기가 효율적인 mmWave 솔루션으로 입지를 굳히는 데 기여했습니다. 많은 엔지니어들이 여전히 스위프 방식의 스펙트럼 신호 분석기를 선호하고 있는데, 스퍼(Spur) 검색 기능과 인접 채널 전력 및 스펙트럼 방출 마스크, 실시간 스펙트럼 분석 등의 대역외 측정 기능이 뛰어나기 때문입니다.

그러나 고주파수 측정과 새로운 mmWave 기술 부문에서 오실로스코프가 새롭게 떠오르고 있습니다. 넓은 대역폭, 신호 무결성, 위상 간섭성, 다중채널 기능 등의 고유한 기능을 갖춘 오실로스코프는 mmWave 테스트에 적합한 툴입니다.

오실로스코프를 사용한 mmWave 기술 테스트에 대해 자세히 알아보려면 UXR1104A Infiniium UXR-시리즈 오실로스코프를 방문하십시오.

www.keysight.com에서 더 많은 정보를 확인할 수 있습니다.

키사이트테크놀로지스 제품, 어플리케이션 및 서비스에 대한 자세한 정보는 키사이트코리아로 문의하십시오. www.keysight.com/find/contactus

