

# RF IC 생산 테스트를 위한 5G RF 교정 절차 수정

앰코테크놀로지 | Vineet Pancholi 수석, 테스트 기술팀

앰코테크놀로지코리아 | 윤형식 수석, TEST 개발팀; 김정연 수석, TEST 개발팀 파트장; 변상호 수석, TEST 개발팀 전문위원; 장민호 수석, TEST 개발팀 팀장

앰코테크놀로지필리핀 | Venancio Kalaw, 무선주파수 및 MEMS, Test 개발 엔지니어링; Mon Lopez 수석, 개발팀 팀장

최신 무선 주파수(RF) 구성 요소는 제품 테스트 사양에 맞는 조립 및 테스트 제공을 목표로 하는 반도체 후공정(OSAT) 업체에 많은 도전과제를 안겨줍니다. 휴대전화, 내비게이션 기기, GPS, Wi-Fi, 송수신기(Rx/Tx) 등을 위한 RF 부품에 대한 수요와 기술이 발전하면서 첨단 5G 휴대폰 및 Wi-Fi 제품에 대한 수요도 함께 증가하고 있습니다. 어떠한 RF 시스템에서든, 테스트 대상 장치(DUT)에서 계측기-포트 정확도 달성은 측정 정확도와 반복성을 향상시킵니다. 반면에 계측기와 DUT 사이의 케이블, 구성 요소, 트레이스, 스위치 및 기타 품목의 특성이 비이상적일 경우 측정 정확도가 저하될 수 있습니다.

RF 기술의 밀리미터파가 발전함에 따라, 과거에는 유효했을 현재 교정 방법을 이제는 사양 확장을 위해 개정해야 합니다. 시스템 교정, 케이블 교정, 부하 기판 트레이스 해제 및 골든 유닛 교정 등 신호 경로 교정의 핵심을 고려하고 이것들을 고유한 장점으로 활용하는 방법을 고려하는 것이 중요합니다.

## mmWave RF 테스트

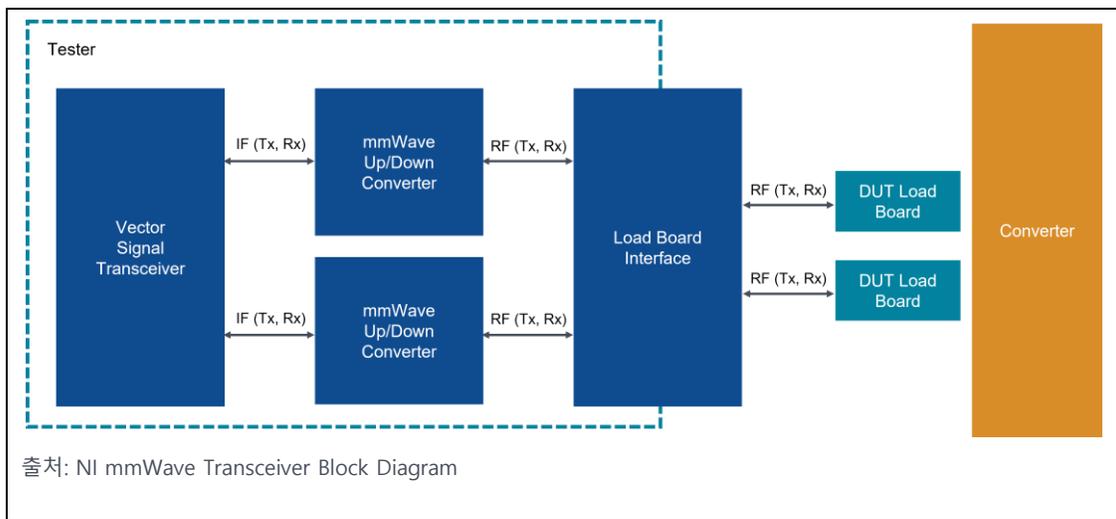


그림 1. mmWave RF 테스트용 테스트 시스템 환경 설정

테스트 장비, 커넥터, 어댑터 및 시스템 레벨 교정 기술을 적절하게 활용하면 정밀한 측정을 통해 5G 구성 요소 또는 장치의 실제 성능을 정확하게 평가할 수 있습니다 (그림 1 참조). 밀리미터파 주파수는 신호 장애에 더 취약하기에 테스트 솔루션, 케이블 및 커넥터 선택에 더욱 신중해야 합니다. 또한 정확한 측정을 위해서는 시스템 레벨의 교정도 필수적입니다.

## RF 교정

교정은 측정 시스템에서 정확한 결과를 산출하기 위한 필수 과정입니다. 테스트 시스템 계측기와 DUT 사이의 경로가 이상적으로 구현되지 않으면 측정 정확도가 떨어지거나 평탄도 오차가 생길 수 있습니다. 따라서 그림 2와 같이 정확도는 테스트 시스템 신호 소스 출력 또는 입력에서 DUT 테스트 포트까지 확장되어야 합니다. 정확하게 교정된 값을 측정하기 위해 테스트 고정부, 케이블, 연결 장치의 주파수 응답을 측정해야 할 수도 있습니다.

5G 기술은 처리량 증대, 지연 시간 감소, 안정성과 효율성 향상 등 무선 통신을 대폭 발전시킵니다. 이를 위해 더 높은 주파수, 더 넓은 대역폭, 새로운 변조 방식, 대규모 다중 입출력(MIMO), 위상 배열 안테나 등과 같은 다양한 첨단 기술과 프로세스가 필요합니다.

이러한 기술은 장치 성능 검증에 새로운 과제를 안겨줍니다. 주요 측정 중 하나인 EVM(Error Vector Magnitude)은 DUT로 전달 및 수신되는 변조 신호를 위한 시스템 레벨 사양입니다. 대부분의 경우 EVM 값은 특정 임계값 이하로 유지되어야 하며, 정확한 측정을 위해서는 테스트 시스템 자체의 방해 수준, 즉 EVM이 낮아야 합니다.

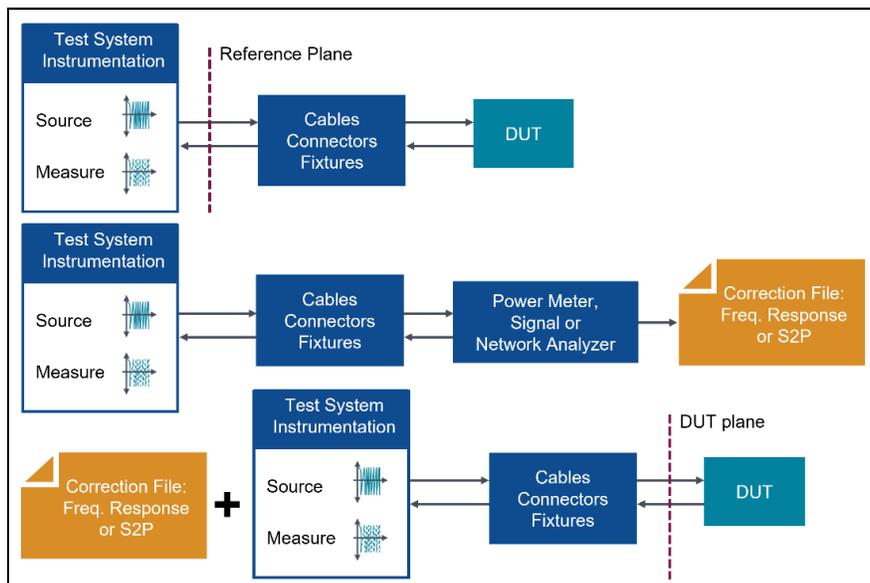


그림 2. RF 교정 설정

이러한 측정 오류 확인 및 수정에 사용되는 방법은 벡터 교정과 스칼라 교정입니다.

## 벡터 교정

벡터 교정은 RF 경로 크기와 위상 특성을 모두 측정해야 합니다. DUT 입출력 포트에서 네트워크 분석기를 교정하거나 교정된 네트워크 분석기를 사용하면 경로의 산란 (S) 계수를<sup>3</sup> 측정할 수 있습니다. 교정 네트워크 분석기를 사용하면 신호 경로를 완전한 복소수 값으로 특성화할 수 있습니다.

## 스칼라 교정

스칼라 교정 방식은 RF 경로의 크기 특성만을 나타내며, 이는 벡터 교정에서 S21 투과 계수의 크기 부분만 측정하는 것과 같습니다. 일반적으로 신호 발생기로 경로의 한쪽 끝을 구동하고 다른 쪽 끝에서 전력계로 신호를 측정합니다. 경로 응답(손실)의 크기는 측정된 출력 수준(dBm 단위)에서 소스 출력 수준(dBm 단위)을 뺀 값이 됩니다. 측정하려는 대역 전체에 걸쳐 여러 주파수에서 이 과정을 반복해 전반적인 크기 특성을 판단합니다.

스칼라 교정은 고급 부품, 어댑터, 케이블을 사용한 시스템에서 허용 가능한 수준의 결과를 얻을 수 있으며, 측정 불확실성을 최소화하고 측정 반복성을 높이는 데 도움이 됩니다. 그러나 전체 벡터 교정에 비해 신호 경로에서 발생하는 임피던스 정합 변화 감지 확률이 낮습니다.

그림 3은 스칼라 RF 교정 실행 순서를 보여줍니다. 교정 테스트 프로그램을 실행하고 DUT 보드와 테스터를 지정하여 경로 교정을 수행합니다. 그런 다음 외부 장비(파워미터, 신호 발생기, 스펙트럼 분석기)를 사용하여 교정 데이터를 수집합니다. 수집된 교정 데이터를 최신 교정 데이터와 비교한 뒤, 편차가 지정된 오차 범위 안에 있으면 교정 데이터를 적용합니다. 편차가 오차 범위를 벗어나면 점검을 거쳐 수리를 하고 교정 절차를 다시 진행합니다.

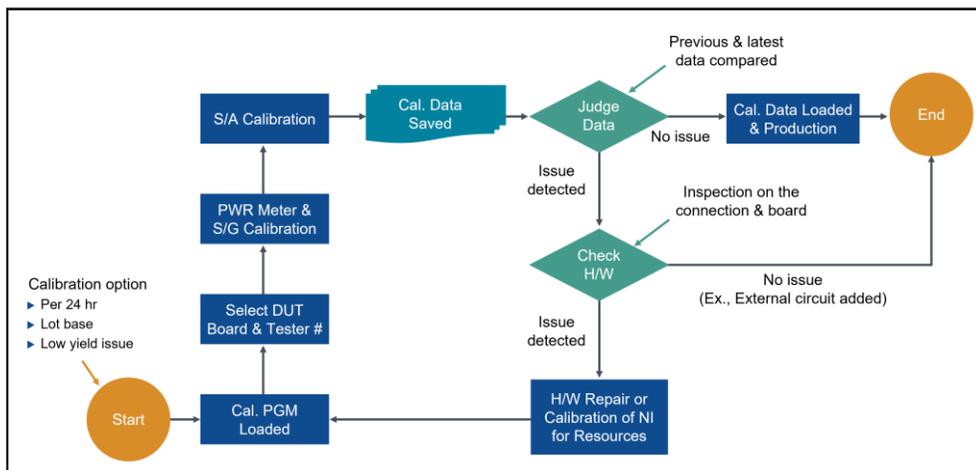


그림 3. 스칼라 RF 교정 절차

## DUT 소켓 교정

RF 교정은 DUT Rx 신호 경로 교정과 DUT Tx 신호 경로 교정의 두 단계로 이루어집니다. 이를 위해 교정 키트의 설계와 설치가 권장됩니다.

1 단계에서는 DUT Rx 신호 경로 교정을 통해 교정 손실률 측정 환경이 구성됩니다. 이때 RF 신호 포고핀에 연결한 교정 키트가 신호 트레이스와 완벽하게 일치해야 합니다. 전력 센서로 입력 신호의 전력 수준을 정확하게 측정하려면, 파워미터를 사용해서 전력 센서를 무력화한 후에 신호 발생기와 전력 센서를 적용해야 합니다. 그래야 DUT 로 가는 입력 신호 트레이스의 손실률을 정확하게 측정할 수 있습니다. 손실 측정은 주파수에 따라 달라지며, 각 생산 테스트 주파수에서 반드시 실시해야 합니다. 교정 손실률 측정 결과는 전부 파일에 저장되며 테스트 양산에 적용됩니다.

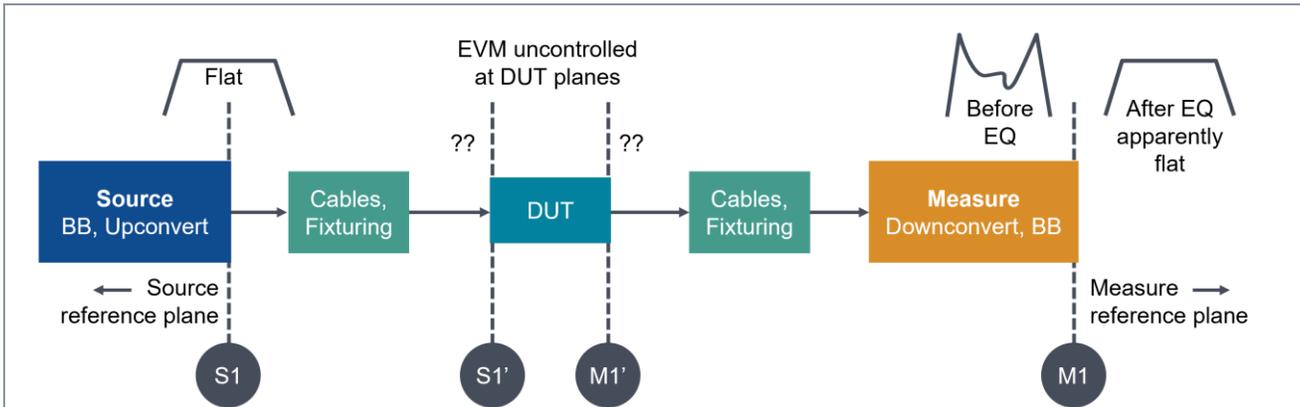
2 단계에서는 교정 손실률 측정 환경을 구성해서 DUT Tx 신호 경로를 교정합니다. 신호 발생기와 스펙트럼 분석기를 사용하여 모든 RF 입출력 신호 포고 핀의 손실 계수를 측정할 수 있습니다. 이를 통해 RF 신호 입력 포고 핀과 RF 신호 출력 포고 핀 사이의 RF 신호 트레이스를 정확하게 교정할 수 있습니다. 또한, 1 단계에서 측정했던 RF 신호 입력 포고 핀의 손실계수를 대입하면 RF 출력 신호 포고 핀에 대한 손실계수만 계산할 수도 있습니다. 이러한 방식으로, 각 제조 테스트 주파수에서 부하 기판으로부터의 왕복 RF 신호 경로의 손실 계수를 교정하는 것이 가능합니다.

DUT까지의 트레이스 전체를 완전히 교정하려면, PCB와 DUT를 연결하는 포고 핀의 손실계수를 반드시 고려해야 합니다. 상대적으로 낮은 주파수에서 포고핀의 손실 계수는 무시할 수 있으므로 RF 교정에서 제외할 수 있습니다. 그러나 5G NR은 밀리미터파 주파수 대역을 사용하기 때문에, 같은 유형의 포고 핀에서도 RF 신호가 상당히 손실될 수 있습니다. 포고 핀으로 인한 손실분은 교정이 필요한 손실 요소에 해당합니다. 기존 소켓 구조에서는 어려웠던 포고 핀 손실의 정확한 측정을 위한 교정 및 테스트 소켓 기능이 새로 개발되었습니다.

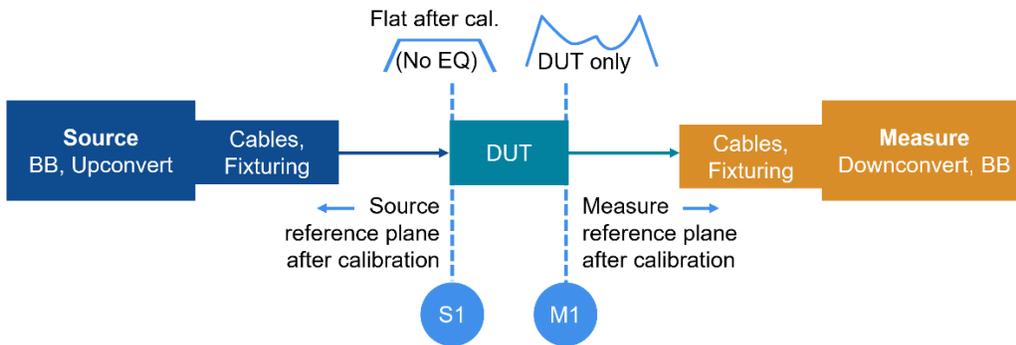
계통오차를 교정하는 기본 방법에는 SOLT(short-open-load-through)와 TRL(through-reflect-line) 두 가지 기술이 있습니다. 두 방법 모두 주파수 대역과 용도에 따른 장점이 있습니다.

## 사례 연구 <sup>12</sup>

5G 캐리어 주파수 및 대역폭에서 테스트 고정부는 테스트 시스템에 상당한 채널 주파수 응답을 부과하고 EVM에 부정적인 영향을 미칠 수 있습니다. 측정에는 테스트 고정부와 DUT 특성이 포함되기에 DUT의 실제 성능을 정확하게 판단하기 어렵거나 불가능할 수도 있습니다. 교정은 테스트 시스템 연결 장치에 있는 테스트 평면을 DUT 입력 연결 장치로 이동시킬 수 있습니다(그림 4 참조).



교정되지 않은 테스트 시스템은 DUT 입력(S1') 신호 품질을 알 수 없습니다. 이때 흔히 하는 실수는 측정(M1')을 균등화해버리는 것이지만, 이는 DUT 이후에 발생하며 특성화할 불완전한 기기 성능의 일부를 제거하기도 합니다.



교정된 테스트 시스템에서는 시스템과 고정부 응답이 제거되어, 품질이 확인된 신호가 DUT(S1)에 입력됩니다. 측정 오차도 제거할 수 있습니다(M1).

그림 4. 교정을 통한 DUT 평면 이동 테스트

그림 5는 직교 주파수 분할 다중화(OFDM)를 위한 RF 변조 테스트 교정 효과를 분석한 결과를 보여줍니다. 28GHz에서 900MHz 대역폭(BW) 신호에 대한 주파수 응답 특성을 비교했습니다. 상단 이미지는 대역폭 상단 끝에서 상당한 롤오프가 이루어지는 진폭 응답을 보여줍니다. 하단 이미지는 위상 응답을 보여주며, 이 역시 대역폭 전체에 상당한 변동이 있습니다.

교정 전엔 주파수 응답 특성의 크기(7dB)와 위상(45도)에 큰 편차가 있었지만, 교정 후엔 주파수 응답 특성의 크기(0.2dB)와 위상(2도)에 변화가 발생했습니다.

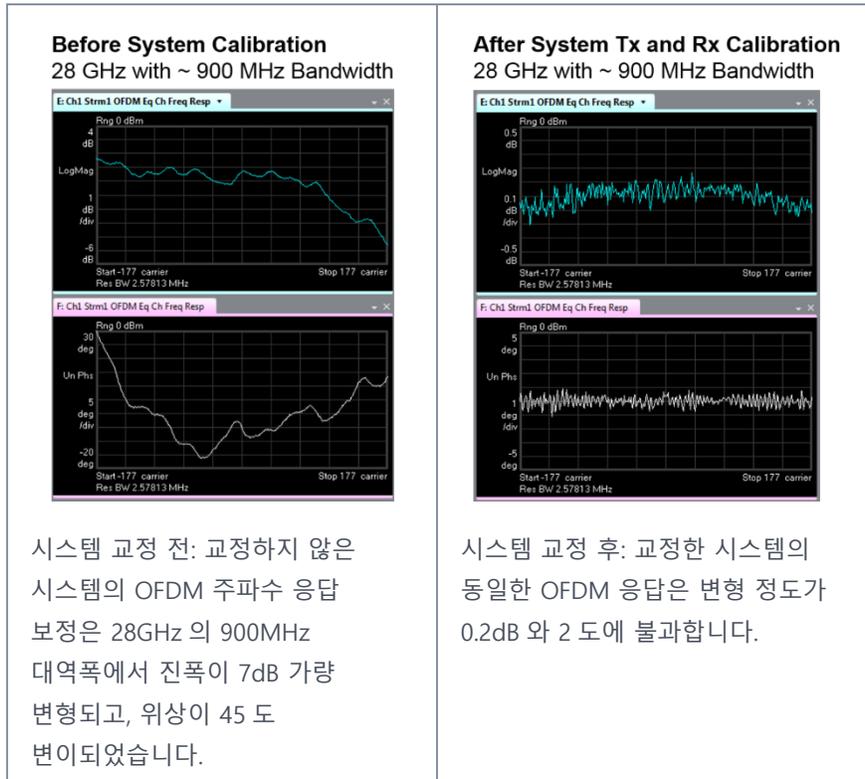


그림 5. 교정 전후의 OFDM 변조 주파수 응답

그림 6 은 단일 반송파 16 직교 진폭 변조(QAM) 신호를 교정한 변조 결과를 보여줍니다. 좌측 상단 이미지는 아주 깔끔한 성상도입니다. 이는 크기와 위상 모두에서 이퀄라이저 응답이 평이하고 사양 내에 있음을 의미하며, 또한 이퀄라이저가 테스트 고정부에 남아있는 채널 응답을 상쇄하지 않음을 보여줍니다. 좌측 하단의 이미지는 약 1GHz 대역폭의 스펙트럼을 보여줍니다. 중앙 하단의 이미지는 오류의 개요를 보여줍니다. EVM 은 0.7% 정도로 기기 사양과 비교했을 때 허용 가능한 마진이며, 이 시스템은 기기의 특성 판단에 이상적입니다.

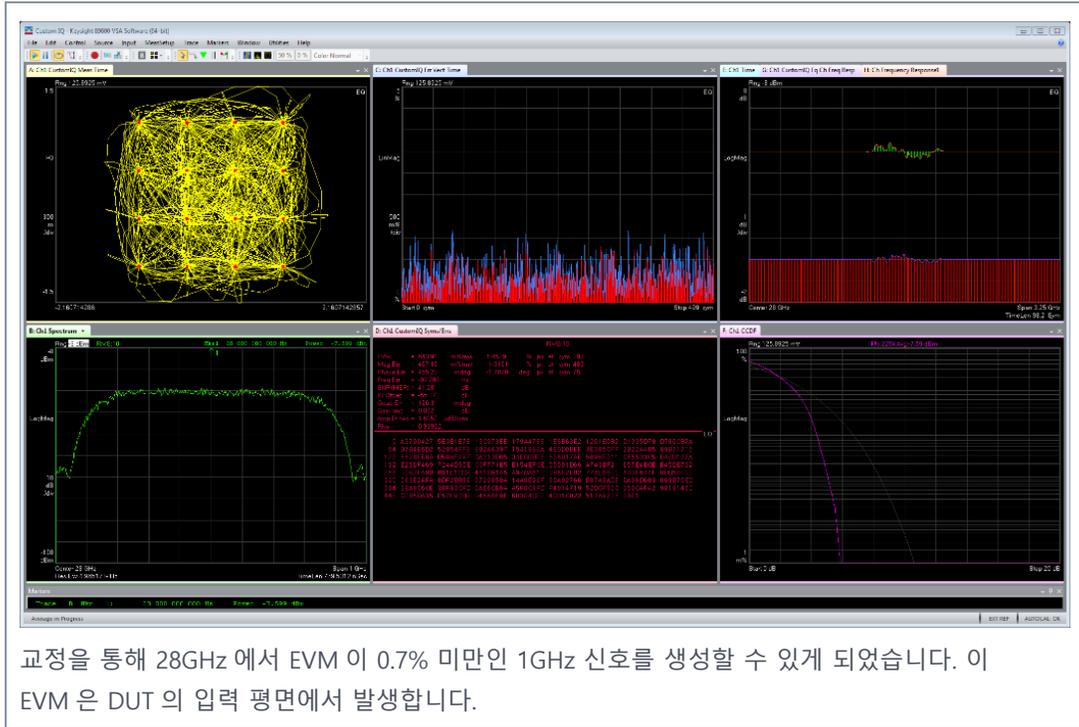


그림 6. 교정 전후의 OFDM 주파수 응답

## 요약

RF 교정은 반도체 RFIC 생산 테스트에서 허용 가능한 처리량, 마진 및 수율을 파악하기 위해 필요한 과정입니다. 안정적이고 반복 가능한 교정은 일관된 결과를 보장하여 제품 또는 설계 문제를 보다 쉽게 파악하여 개발 및 제조 지연을 최소화합니다. 앰코의 RF 교정은 고객사의 부품 생산 테스트를 성공적으로 수행하기 위한 필수 과정입니다.

## 참고 자료:

1. "Using Calibration to Optimize Performance in Crucial Measurements" (Keysight, 5992-0891)
2. "Accelerate 5G Testing: 5G Manufacturing Test Considerations" (Keysight, 5992-3659)
3. "S-Parameters" Microwaves101.com, Link
4. "4 Hints for Better Millimeter-wave Signal Analysis" 백서 (Keysight, 5992-2970)
5. "A Novel BiST and Calibration Technique for CMOS Down-Converters" 2008 년 제 4 회 IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications (ICCS 2008)

6. "Self-calibration of input-match in RF front-end circuitry" 제 52 호 IEEE Transactions, 2005 년 12 월 12 일 발간
7. "Calibration techniques of active BiCMOS mixers" 제 37 호 IEEE Solid-State Circuits 저널, 2002 년 6 월 6 일 발간
8. "Digital calibration of gain and linearity in a CMOS RF mixer" 2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)
9. "Verification of wafer-level calibration accuracy at high temperatures" 2008 년 제 71 회 ARFTG Microwave Measurement Conference
10. "A multiline method of network analyzer calibration" 제 39 호 IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991 년 7 월 7 일 발간
11. "On-wafer calibration techniques for giga-hertz CMOS measurements" Proceedings of 1999 International Conference on Microelectronic Test Structures
12. "Comparison of the "pad-open-short" and "open-short- load" deembedding techniques for accurate on-wafer RF characterization of high-quality passives" 제 53 호 IEEE Transactions, 2005 년 2 월 2 일 발간
13. "Should I be worried about 5G calibration?" Keysight Community 블로그