기 술 원 고

사용자에 의한 Ecal 특성 변환
-새로운 Ecal 기능으로 사용자의 특정 요구에 맞게 커스텀화 구현!

James Liu/Ken Wong
애질런트테크놀로지스

개 요

벡터 네트워크 분석기(VNA) 교정은 기존에는 매우 단순 반복적인 작업이었지만 애질런트의 새로운 전자 교정 모듈 또는 Ecal 모듈 시리즈의 출시로 변화하였다. Ecal 모듈을 사용하면 기계적 교정을 사용할 때 걸리는 시간에 비해 매우 짧은 시간에 교정을 수행할 수 있으며, 이는 빠르고 정확한 교정 기능에 국한되지 않는다. 새로운 "사용자 특성 변환" 기능을 통해 사용자는 스스로 Ecal 모듈의 특성을 재 정의 할 수 있다. 이 백서에서 설명될 기법과 함께 이 기능을 활용하면 혼합 커넥터, 도파관 및 픽스쳐 교정을 모두 처리할 수 있다.

I. 도 입

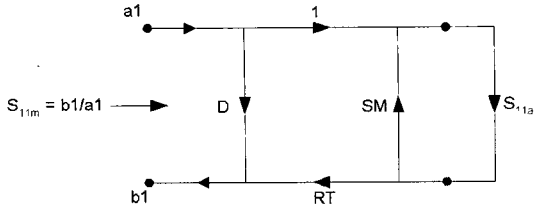
ECal은 VNA 교정 방식을 혁신하였다[1, 2]. 편리하게 빠른 속도에서 이루어지는 정확한 교정은 사실상 동급 기계적 교정에서는 불가능한 일이었다. ECal의 속도와 편이성 보완을 위해 "사용자 특성 변환" 기능이 추가되었다. 이 새로운 기능으로 현재 ECal 모듈 라인의 다기능성이 향상됨으로써 전에는 ECal을 사용할 수 없었던 여러 어플리케이션에도 ECal을 사용할 수 있게 되었으며, 이 기능은 애질런트의 새로운 PNA 및 ENA 시리즈 벡터 네트워크 분석기에서 지원된다.

이전에는 혼합 커넥터 디바이스를 측정하려면 여러 cal 키트를 사용해야 했으며 아직도 어댑터를 사용할 경우 생길 수 있는 사용자 오류로 인한 불확실성은 존재한다. 사용자 특성 변환 기능은 이 문제를 비롯하여 많은 다른 교정 문제를 해결하여 준다. 이 기능을 사용하여 ECal 사용자는 최대 5개까지 ECal 모듈에 각기 다른 상태의 교정 정보를 기록할 수 있다. 이러한 교정은 ECal 모듈과 함께 사용되는 커넥터 어댑터의 특성을 분석하고 픽스쳐 및 프로브를 de-embed하는 데 사용할 수 있는 것은 물론 다양한 기타 어플리케이션에도 사용 가능하다.

II. ECal - 작동 방식

ECal의 중심부는 알려진 값이 있는 여러 반사(reflective) 임피던스 상태와 최소 하나의 투과(transmissive) 임피던스 상태로 구성되어 있다. 네트워크 분석기의 표준 1포트 오류 정정은 <그림 1>에 나와 있는 신호 흐름 그래프와 방정식을 따른다.

1포트 교정 동안 방향성 오류(D), 소스 매치(SM) 및 반사 추적(RT) 값이 결정된다. ECal은 임피던스 표준에 대한 알려진 값(S_{11a})을 제공하며, 네트워크 분석기에서는 원시(raw) 측정값(S_{11m})을 제공해 줍니다. 그러므로 <그림 1>에 나와 있는 방정식은 계산이 필요한 3가지 알 수 없는 값(D, SM, RT)으로 단순화된다. 알 수 없는 값이 3개 있다는 것은 값을 구하기 위해 적



$$S_{11m} = D + \frac{RT \cdot S_{11a}}{1 - SM \cdot S_{11a}} \quad \text{(Eq 1)}$$

여기서
D=커플러 방향성 오류(Directivity)
SM=소스 매치(Source Match)
RT=반사 추적(Reflection Tracking)

〈그림 1〉 포트 오류 정정 신호 흐름 그래프

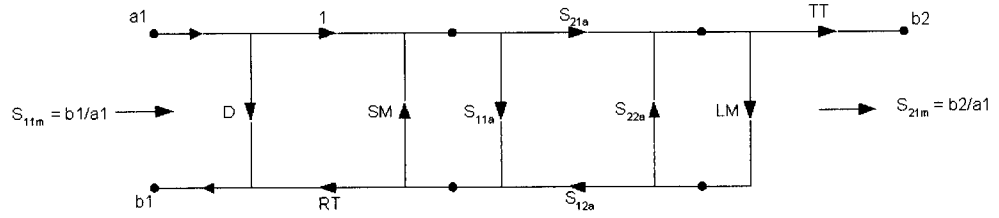
어도 3개의 독립적인 방정식이 필요하다는 것을 의미한다. 표준 기계적 교정에서는 *Open, Short* 및 *Load*와 같은 3개의 임피던스 표준을 사용하여 이 방정식을 해결하므로 방정식 해법을 위한 최소 요건은 충족된다. ECal에서는 전형적으로 1포트 오류 정정에 4개의 알려진 반사 임피던스 표준을 제공해 줍니다. 그러므로 여기서 얻어진 해법은 과잉-측정된(overdetermined) 것으로 간주되며 모든 4개 임피던스 시나리오의 최소자승적합(least squares fit)으로 간주된다.

2포트 오류 정정은 1포트 오류 정정과 상당 부분 동일한 기법을 따릅니다. 〈그림 2〉에는 표준 2포트 오류 다이어그램과 방정식의 방정식이 나와 있다.

〈그림 2〉 다이어그램에서는 D, SM 및 RT를 1포트 오류 정정 기법으로 이미 구했다고 가정한다. 여기서도 ECal 모듈은 S_{11a}, S_{21a}, S_{12a}, S_{22a}라는 알려진 값을 제공하고 네트워크 분석기는 S_{11m}, S_{21m}을 제공한다. 로드 매치(LM) 조건과 전송 추적(TT)은 방정식 2와 3에서 구할 수 있다.

참고 : 앞서 언급한 오류 조건은 순방향(Forward) 구성과 관련이 있다. 방정식 1~3을 약간 수정하면 역방향 구성에 대한 유사한 조건을 구할 수 있다.

이 방법의 정확도는 임피던스 표준의 "실제" 값에 크게 좌우된다[3]. "실제" 값은 모델에서 도출하거나 네트워크 분석기를 사용하여 측정한다. ECal 임피던스 표준은 복잡한 구조로 인해 직접 측정된다. "실제" 값에는 모델의 정확도나 측정 정확도로 인해 어느 정도의 불확실성이 존재한다. 알려진 값의 불확실성이 크면 클수록 ECal 장치에서 생성되는 교정의 오류가 커진다. 애질런트는 ECal 모듈 측정 시 TRL 성능과 유사



$$S_{11m} = D + TT \cdot \frac{[S_{11a} \cdot (1 - S_{22a} \cdot LM) + S_{21a}^2 \cdot LM]}{(1 - S_{11a} \cdot SM - SM \cdot S_{21a}^2 \cdot LM - S_{22a} \cdot LM)} \quad \text{(Eq 2)}$$

$$S_{21m} = \frac{TT \cdot S_{21a}}{1 - S_{11a} \cdot SM - SM \cdot S_{21a}^2 \cdot LM - S_{22a} \cdot LM} \quad \text{(Eq 3)}$$

여기서
D=커플러방향성오류(Directivity)
SM=소스 매치(Source Match)
RT=반사 추적(Reflection Tracking)
TT=전송 추적(Transmission Tracking)
LM=로드 매치(Load Match)

〈그림 2〉 2포트 오류 정정 신호 흐름 그래프

한 교정 기법을 사용하므로 불확실성 오류의 양이 제한된다. 종종 ECal의 정확도가 원래 교정의 측정 정확도와 ECal 임피던스 표준 측정에 사용되는 테스트 설정에 의해서만 제한되므로 Ecal을 전송 표준이라고도 한다.

또 다른 오류 소스로는 임피던스 표준의 안정성을 들 수 있다. 일반적으로 참조 표준은 무언가 움직이지 않거나 안정적인 것을 의미한다. 모든 전자 장치에는 본질적으로 어느 정도의 불안정성이 있다. ECal 모듈은 이러한 점을 염두에 두고 설계되었다. 즉, 커넥터 반복 오류를 줄이기 위한 고정밀 커넥터와 함께 가장 안정적인 전기 부품만 ECal 제조에 사용된다. 또한 환경 온도로 인한 성능 편차를 제한할 수 있도록 모듈에 열보정(thermal compensation)을 사용하기도 한다.

Ⅲ. 사용자 특성 변환 - 작동 방식

종종 사용자들은 커넥터 옵션이나 애질런트에서는 제공하지 않는 ECal 구성과 함께 ECal의 속도와 편이성을 누리길 원한다. "사용자 특성 변환"을 사용하면 사용자가 자체적으로 ECal 모듈을 다시 특성을 변환 시킬 수 있다. ECal의 플래시 메모리는 "출고시 특성(Factory Characterized)" 공간과 "사용자 특성(User Characterized)" 공간으로 분할된다. 그렇기 때문에 "공장 특성 공간"에 저장된 데이터에 영향을 미치지 않고도 "사용자 특성 변환"을 수행할 수 있다. "사용자 특성 변환" 수행 프로세스는 간단한 3단계 알고리즘을 따른다.

1. 원하는 커넥터 구성으로 분석기 교정
2. 필요시 어댑터 등을 연결한 상태에서 ECal 모듈의 임피던스 표준의 특성 측정
3. 측정된 데이터를 ECal 플래시 메모리로 전송

이 프로세스에서는 "ECal-작동 방식" 섹션에서 설명했듯이 임피던스 표준의 "실제" 값을 측정한다. 그러므로 단계 1에서 수행된 교정의 정확도가 ECal 모듈에서 재현하는 교정 품질에 직접 영향을 미치게 된다.

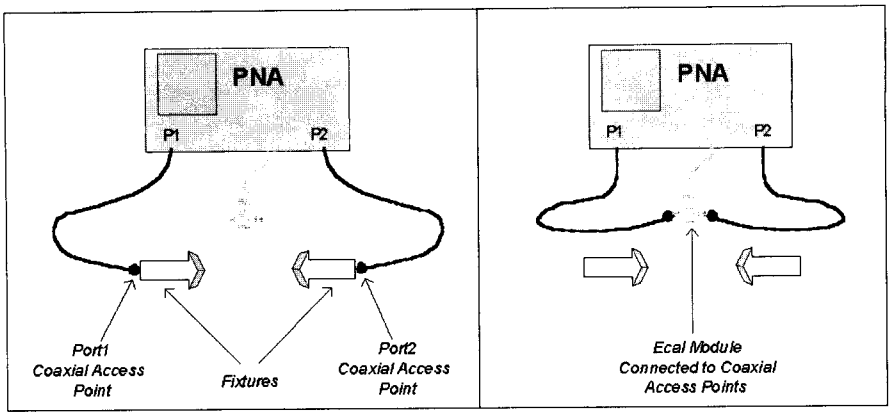
일단 이러한 단계를 완료한 후에는 애질런트 PNA 또는 ENA 시리즈 네트워크 분석기에서 특성이 변환된 ECal 모듈을 사용할 수 있다. 이 방법은 다음과 같은 시나리오에 사용 가능하다.

- 다른 커넥터 제품군으로 ECal 모듈을 다시 특성 변환할 경우(즉, 도파관)
- 혼합 커넥터 교정을 위해 ECal 모듈을 다시 특성 변환할 경우(즉, 도파관에서 동축)
- 픽스쳐 어플리케이션을 위해 ECal 모듈을 다시 특성 변환할 경우(즉, 웨이퍼 프로브)
- 재인증을 위해 ECal 모듈을 다시 특성 변환할 경우

Ⅳ. ECal 및 픽스쳐링 - 기법

일부 경우, ECal을 사용자의 테스트 설정에 맞출 수 있는 어댑터가 없을 수도 있다. 예를 들어, 웨이퍼 프로브를 쉽게 모듈에 연결할 수 있는 적용 가능한 솔루션은 없다. 그러나 몇 가지 특수 기법을 사용하면 ECal의 속도와 편이성을 이러한 상황에 맞추어 적용시킬 수 있다. 여기에 설명된 기법은 픽스쳐 자체에서 교정이 수행되는 한 어떠한 픽스쳐링 상황(즉, 웨이퍼 프로브, 안테나 등)에도 적용 가능하다.

네트워크 분석기는 동축 스타일 커넥터와 함께 판매되므로 이는 모든 테스트 설정에는 픽스쳐 설정에 대한 일종의 동축 연결이 있다는 것을 의미한다. 그러므로 동축 액세스 포인트에서 ECal 모듈에 연결할 수 있다. 〈그림 3〉의 다이어그램에 나와 있는 일반 픽스쳐 설정을 조사해 보면 ECal 모듈을 연결할 수 있는 액세스 포인트를 금방 발견할 수 있다.



〈그림 3〉 사용자 특성분석 웨이퍼 프로브 픽스쳐링

연결 포인트를 일단 설정하면 픽스쳐 교정용 ECal 모듈의 특성 분석을 위해 다음 단계를 따른다.

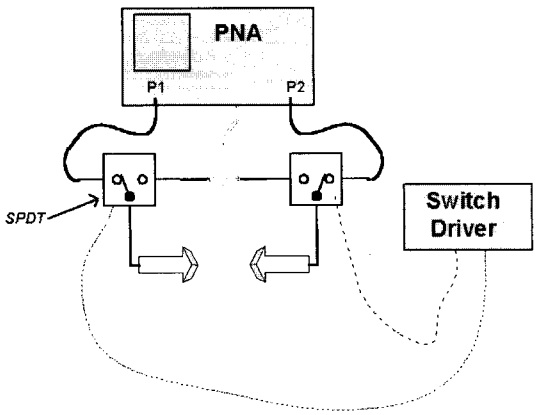
1. 원하는 방법으로 픽스쳐 교정(즉, 웨이퍼 프로브 및 표준을 사용하는 TRL)
2. 픽스쳐에 대한 동축 연결을 해제하고 ECal 모듈에 연결
3. ECal 모듈 특성 측정
4. 측정된 데이터를 ECal 플래시 메모리로 전송

ECal로 픽스쳐를 교정하려면 다음 단계를 따라야 한다.

1. 픽스쳐에 대한 동축 연결을 해제하고 ECal 모듈에 연결
2. 사용자에 의해 변환된 특성을 선택하여 ECal 수행
3. ECal에 대한 동축 연결을 해제하고 픽스쳐에 재연결

이 방법을 사용하면 교정 또는 특성분석 프로세스로부터 픽스쳐 자체의 성능을 embed하거나 de-embed 할 수 있다. 그러므로 이 교정 기법은 ECal의 특성분석 시 사용된 특정 픽스쳐 설정에서만 유효하며 다른 픽스쳐에 사용 될 수는 없다. 각기 다른 픽스쳐를 사용할 경우 ECal 모듈에 다른 사용자 특성 공간을 사용하여 유사한 프로세스를 수행하여 저장 후 선택 사용 한다.

위에 설명된 방법의 한 가지 결점은 픽스쳐에 연결된 케이블 연결을 해제해야 한다는 데 있다. 일부 어플리케이션에서는 이러한 연결 해제 작업이 지루할 수 있으며 또는 반복해서 연결하면 픽스쳐가 손상될 수 있다는 우려도 있다. 이러한 상황에서도 사용할 수 있도록 장비를 몇 가지 추가하여 약간 다른 구성을 사용할 수 있다. 〈그림 4〉에 나온 다이어그램은 2개의 SPDT(single-pole double-throw) 스위치 및 약간의 추가 케이블링으로 연결된 스위치 드라이버를 설명한다. 케이블링은 케이블 드리프트 오류(cable-drift error)를 줄이기 위해 최소로 유지한다.



〈그림 4〉 픽스쳐링 어플리케이션에 스위치를 이용한 ECal

ECal 교정이나 ECal 특성분석 시 SPDT를 ECal 모듈로 스위칭해야 한다는 점을 제외하고는 프로세스 방법은 동일하다. 역으로 DUT에서 측정이 수행되거나 픽스쳐를 직접 교정할 때는 스위치를 픽스쳐로 설정해야 한다. 이러한 설정의 장점은 시스템으로 유입되는 커넥터 반복 오류나 케이블 이동 오류가 없다는 것이다. 스위치의 반복성만으로 이러한 이점이 생기는 것입니다. 가장 높은 주파수 어플리케이션에서는 스위치의 반복성은 케이블 이동보다 오류가 더 적다.

V. ECal 및 픽스쳐링 - 이론

픽스쳐링 어플리케이션에 사용될 경우 ECal은 물리적 측정 플레인과는 다른 교정 플레인으로 측정을 수행할 수 있는 기법을 활용한다. 다음은 이 개념에 대한 수학적/분석적 증명이다.

참고 : 이 개념을 이해할 때, 교정 플레인은 참조 플레인 위치를 수학적으로 표시한 것이고 측정 플레인은 참조 플레인의 물리적 위치를 표시한 것이라는 점을 이해하면 도움이 될 것이다.

이 프로세스의 첫 번째 단계는 픽스쳐 레벨에서 교정을 수행하는 것이다. 예를 들어, 픽스쳐가 웨이퍼 프로브라면 웨이퍼 TRL이나 SOLT 교정이 사용될 것이다. 〈그림 5〉에는 일반 픽스쳐링 어플리케이션에 대한 토포그래피 레이아웃(topographical layout)이 나와 있다.

픽스쳐 플레인에서 수행한 교정 결과로, 픽스쳐 플레인 뒤에서 본 시스템의 오류 계수가 결정된다.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TE_{11} & TE_{12} \\ TE_{21} & TE_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Gamma_{DUT} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{(Eq 4)}$$

$$[[T_E]] \equiv \begin{bmatrix} TE_{11} & TE_{12} \\ TE_{21} & TE_{22} \end{bmatrix} = [[T_{NA}]] * [[T_C]] * [[T_F]] \quad \text{(Eq 5)}$$

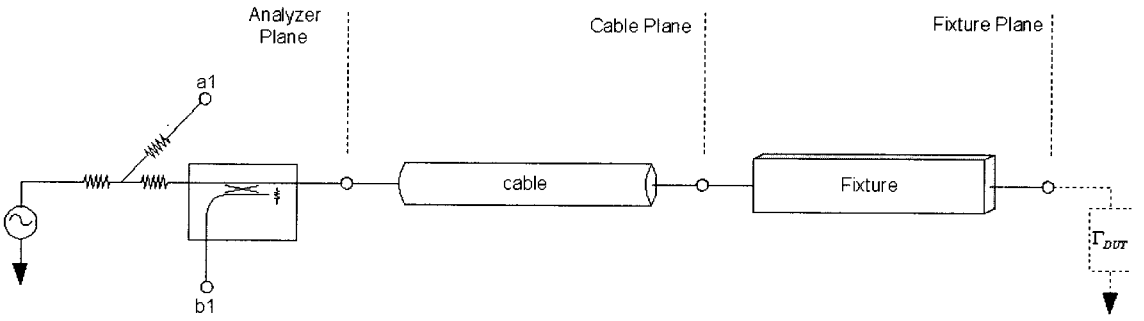
where $[[T_{NA}]] \equiv$ cascade parameter of the VNA error box

$[[T_C]] \equiv$ cascade parameter of the cable,

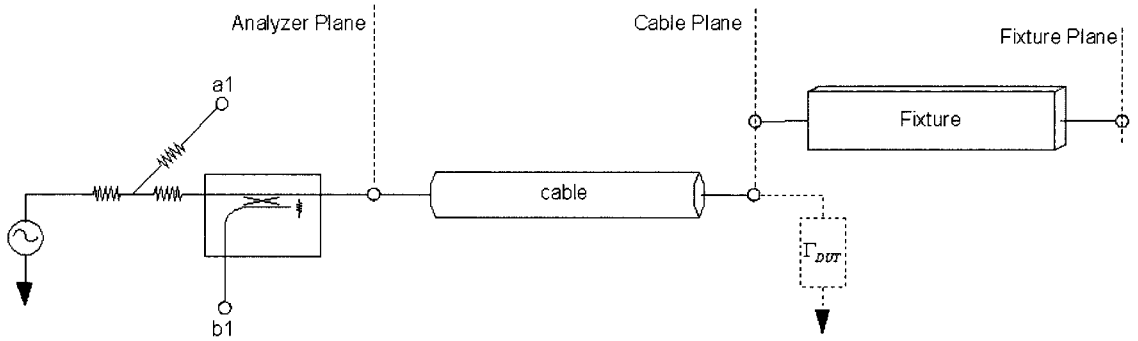
$[[T_F]] \equiv$ cascade parameter of the fixture

$\frac{b_1}{a_1} \equiv$ network analyzer measured reflection

이 오류 계수는 테스트 대상 장치의 "실제" 특성을 컴퓨팅할 수 있도록 모든 측정한 데이터에 적용된다. 케이블 플레인에서 장치를 측정할 경우 동일한 오류 계수가 사용된다.



〈그림 5〉 픽스쳐 블록 다이어그램



〈그림 6〉 픽스쳐가 제거된 픽스쳐 설정 블록 다이어그램

장치의 VNA 컴퓨팅 응답(Γ_{DUT}')은 다음과 같다.

$$\left[\begin{bmatrix}\Gamma_{DUT}'\\1\end{bmatrix}\right]=[[T_E]]^{-1}*\left[\begin{bmatrix}b_1\\a_1\end{bmatrix}\right]$$
$$=[[T_F]]^{-1}*[[T_C]]^{-1}$$
$$*[[T_{NA}]]^{-1}*\left[\begin{bmatrix}b_1\\a_1\end{bmatrix}\right] \quad \text{(Eq. 6)}$$

케이블 플레인에 연결된 장치의 실제 응답은 다음과 같아야 한다.

$$\left[\begin{bmatrix}\Gamma_{DUT}\\1\end{bmatrix}\right]=[[T_C]]^{-1}*[[T_{NA}]]^{-1}$$
$$*\left[\begin{bmatrix}b_1\\a_1\end{bmatrix}\right] \quad \text{(Eq 7)}$$

두 방정식 6과 7로 방정식을 세우면 -

$$\left[\begin{bmatrix}\Gamma_{DUT}'\\1\end{bmatrix}\right]=[[T_F]]^{-1}*\left[\begin{bmatrix}\Gamma_{DUT}\\1\end{bmatrix}\right] \quad \text{(Eq 8)}$$

네트워크 분석기의 정정된 응답은 픽스쳐의 응답이 거기서 de-embed된 DUT 응답임을 위의 방정식에서 추론해 볼 수 있다. 그러므로 이러한 방식으로 네트워크 분석기를 통해 ECal 모듈의 특성을 분석하면 픽스쳐의 응답이 거기서 de-embed된 ECal 모듈의 응답을 측정하는 효과를 얻을 수 있다.

한 단계 더 나아가 교정 프로세스에서 "픽스쳐 특성분석 ECal 모듈"을 사용하면 픽스쳐의 응답이 측정 플레인에 수학적으로 embed된다.

$$\text{Let}\left[\begin{bmatrix}A & B\\C & D\end{bmatrix}\right]=[[T_{NA}]]*[[T_C]] \quad \text{(Eq 9)}$$

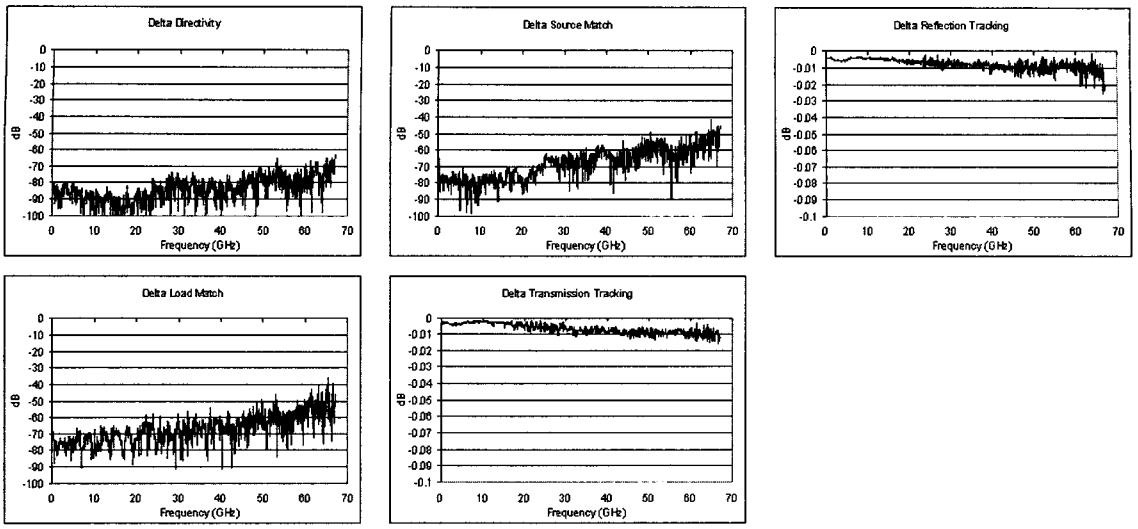
$$\left[\begin{bmatrix}b1_1 & b1_2 & b1_3\rightarrow b1_n\\a1_1 & a1_2 & a1_3\rightarrow a1_n\end{bmatrix}\right]=\left[\begin{bmatrix}A & B\\C & D\end{bmatrix}\right]$$
$$*[[T_F]]^{-1}*\left[\begin{bmatrix}\Gamma_1 & \Gamma_2 & \Gamma_3\rightarrow\Gamma_n\\1 & 1 & 1\rightarrow 1\end{bmatrix}\right] \quad \text{(Eq 10)}$$

오류 정정 조건- A, B, C, D를 구하려면 :

$$\text{Let-}[[M]]=\left[\begin{bmatrix}b1_1 & b1_2 & b1_3\rightarrow b1_n\\a1_1 & a1_2 & a1_3\rightarrow a1_n\end{bmatrix}\right]$$
$$;[[\Gamma]]=\left[\begin{bmatrix}\Gamma_1 & \Gamma_2 & \Gamma_3\rightarrow\Gamma_n\\1 & 1 & 1\rightarrow 1\end{bmatrix}\right]$$
$$\text{then}\ [[M]]*[[M]]^T=\left[\begin{bmatrix}A & B\\C & D\end{bmatrix}\right]$$
$$*[[T_F]]^{-1}*[[\Gamma]]*[[M]]^T \quad \text{(Eq 11)}$$

검사해보면 $[[T_F]]$이 $\left[\begin{bmatrix}A & B\\C & D\end{bmatrix}\right]$의 해법에 embed되었다는 것을 알 수 있다.

2포트 오류 조건에도 유사한 주장이 가능하다.



〈그림 7〉 Delta 오류 조건

VI. ECal 전송 정확도 - 교정 전송 검증

전송 정확도를 살펴보거나 ECal 모듈의 특성 분석을 검증하려면 다음과 같은 단계를 수행해야 한다.

1. 분석기 교정
2. 오류 조건(E1) 저장
3. ECal 모듈 특성 변환
4. 사용자 특성 변환 ECal 모듈로 분석기 교정
5. 오류 조건(E2) 저장

두 세트의 오류 조건 간의 차이를 구별하여 ECal 모듈과 원래 교정 간 오류의 양을 볼 수 있다.

전형적인 그래프가 아래에 나와 있다. 이것은 교정의 잔류(residual) 오류가 아니다. 단순히 두 교정 사이의 차이일 뿐이다. 이 차이를 소스 교정에서 얻은 잔류(residual) 조건에 대한 *추가적* 오류라 생각할 수 있다.

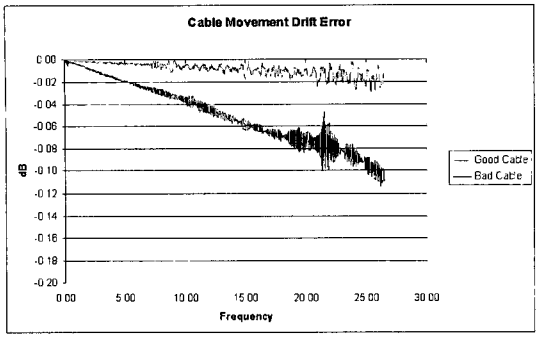
VII. 사용자 특성분석 - 오류 요인

일반적으로 ECal 교정의 정확도는 ECal 임피던스 상태의 정확도에서 유도된다. 불확실성이 낮을수록 ECal 모듈을 더욱 정확하게 교정할 수 있다. 이러한 불확실성은 다음과 같은 여러 요소에 기인한다.

- 시스템의 측정 정확도
  - 교정 정확도
  - 테스트 시스템 안정성
- ECal 모듈의 안정성
- 보간 오류

앞서 말했듯이 ECal이 전송 표준으로 간주되므로 원래 교정은 ECal의 근본적인 정확도 한계에 부딪힐 수 밖에 없다. 그러므로 ECal은 모듈의 특성 변환에 사용된 원래교정보다 더 정확한 교정을 수행할 수 없다.

교정 정확도와 더불어 테스트 설정 안정성도 최고의 교정 정확도를 유지하는 데 있어 중요하다. 〈그림 8〉에 나열되어 있는 데이터는 케이블 이동이 네트워크 분석기 측정에 어떻게 오류를 유발할 수 있는지 보여준다.



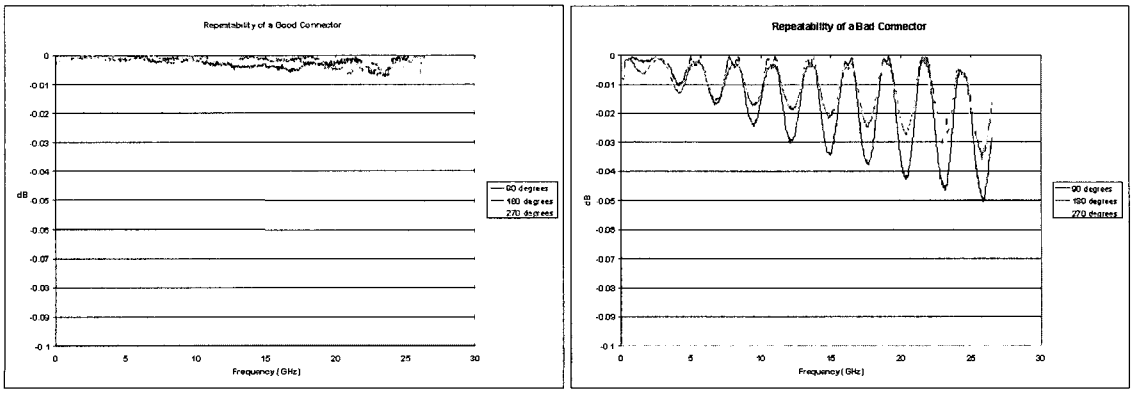
〈그림 8〉 케이블 이동 드리프트 오류

2개의 트레이스는 케이블을 3인치 옮겨서 생긴 측정 오류의 양을 보여준다. *우수 케이블*이라는 레이블이 표시된 녹색 트레이스에서는 고품질 케이블을 사용하고 *불량 케이블*이라는 레이블이 표시된 청색 트레이스는 저품질 케이블을 사용한다. 저품질 케이블을 사용할 경우 0.1dB(1%)의 측정 오류가 늘어날 수 있지만 고품질 케이블을 사용하면 이 오류를 대략 0.02dB(0.2%)까지 줄일 수 있다. 측정 정확도는 교정 전송 품질을 ECal 모듈과 직접 연관시키기 때문에 중요하다. 이 그래프에 나타난 0.1dB 오류가 ECal 임피던스 상태의 특성분석 값의 불확실성의 정도라고 가정해 보면, 이는 ECal 모듈에서 0.1dB(1%) 보다 큰 측정 정확도를 내지 못한다는 것을 의미한다. ECal 모듈을 측정하는 데 불확실성이 낮으면 낮을수록 ECal 모듈의 성능이 더욱 향상된다.

또 다른 잠재적 오류 요인으로는 ECal 모듈의 안정성이 있다. 모든 ECal 모듈은 특정 대역에서의 성능이 보장되도록 공장에서 정확도 및 안정성 파라미터에 대한 측정을 거치고 출시된다. "사용자 특성 변환" 기능을 사용하면 사용자가 어댑터가 있는 ECal 모듈과 모듈에 연결된 케이블의 특성을 분석할 수 있다. 어댑터나 케이블의 반복성은 "사용자 특성 변환" 교정에 있어 추가적인 오류 요인이 될 수 있다. 〈그림 9〉에 나와 있는 데이터는 우수 커넥터와 불량 커넥터를 사용했을 경우 각각 커넥터 반복성 오류에 기여하는 정도를 나타내고 있다.

위에 설명된 데이터는 어댑터 한쪽 끝은 short에 연결하고 반대쪽 끝은 네트워크 분석기에 연결된 상태에서 측정하여 얻은 결과이다. 그런 다음, 어댑터의 연결을 해제시키고 원래 위치로부터 90도씩 증가시키면서 다양한 각도로 회전시킨다. 처음 위치 대비 각 위치에 대한 로그 벡터 진폭 차이를 계산한다.

우수 커넥터와 불량 커넥터의 차이는 매우 분명하게 드러난다. 오염되었거나 손상된 커넥터의 성능은 "우수" 커넥터의 성능보다 5배 정도 떨어진다. 커넥터 반복성 정도도 ECal 모듈 특성분석의 불확실성에 직접 영향을 미친다. 따라서 앞서 언급 했다시피 이는 ECal 모듈의 교정 정확도에도 직접 영향을 미치게 된다. 커넥터 반복성



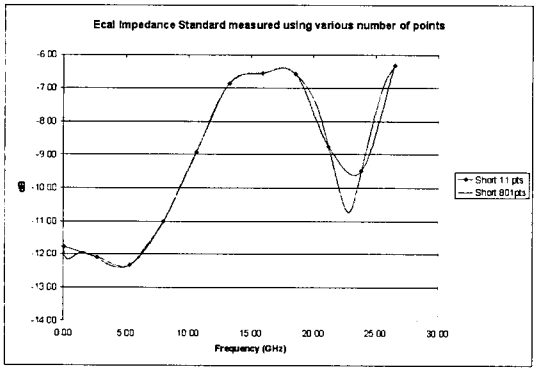
〈그림 9〉 커넥터 반복성(repeatability) 오류

과 케이블 불안정성으로 인해 장치 측정시 부가적인 오류가 발생할 수 있다.

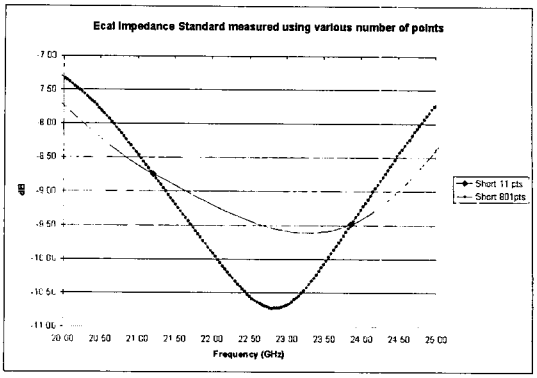
마지막으로 설명할 잠재적인 오류 요인은 "사용자 특성 변환"에서 사용되는 주파수 간격과 관련 있다. 앞에 말했듯이 ECal 모듈의 플래시 메모리에는 공장에서 측정한 ECal 모듈의 임피던스 표준에 대한 데이터가 들어 있다. 이 데이터는 대략 50 MHz 간격으로 떨어져 있는 서로 다른 주파수 포인트의 집합이다. 정상 작동 중에 네트워크 분석기는 ECal 모듈의 데이터를 네트워크 분석기의 현재 주파수 목록으로 보간한다. 그러나 보간은 ECal 모듈의 특성분석 데이터에 있는 포인트와 맞지 않는 주파수 포인트에 대해서만 수행된다. 보간의 알고리즘은 본래 관심 주파수 앞뒤의 몇 포인트를 관찰하여 데이터의 "커브 피팅(curve fit)"하는 것이다. 그러므로 임피던스 표준의 전체 범위를 적절히 특성분석할 수 있도록 주파수 간격 또는 샘플링을 선택해야 한다.

보간이 정확히 이뤄지려면 주어진 범위에서 임피던스 표준의 동작을 정확히 설명하기에 충분한 포인트가 있어야 한다. 다음 예를 보면,

여기에서는 두 개의 주파수 간격 세트인 11 포인트와 810 포인트를 사용하여 동일한 ECal임피던스 표준에 대한 수행된 두 가지 측정 세트가 나와 있다. 보간 개념을 설명할 수 있도록 11-포인트 측정의 이산 데이터 포인트가 강조 표시되어 있다. 〈그림 10〉의 그래프에서 볼 수 있듯이 각 데이터 포인트는 두 트레이스에 공통이다. 그



〈그림 10〉 샘플링 오류



〈그림 11〉 샘플링 오류(확대된 영역)

러나 포인트간 보간된 트레이스 데이터는 그래프 간에 큰 차이가 있다. 20~25 GHz 사이에 초점을 맞추어 보면 다른 관점에서 데이터를 볼 수 있다.

26.5 GHz 범위에서 801 포인트를 사용하는 포인트 밀도는 이 특정 ECal 임피던스 표준의 특성을 고유하게 분석하기에 충분하다. 한 번에 몇 개의 데이터 포인트만 살펴보면, 트레이스가 곡선이나 직선처럼 나타난다. 이러한 곡선과 직선은 측정된 데이터 포인트에서 쉽게 보간될 수 있다. 본질적으로, 이는 Ecal에서 관심 주파수 앞뒤의 몇몇 포인트를 관찰하고 직선이나 곡선 동작에 기반하여 값을 보간함으로써 보간을 수행하는 방식이다. 정확한 보간을 위한 충분한 포인트를 확보하지 못하면 보간 오류가 생길 수 있다. 보간 오류란 실제 값과 보간된 값 사이의 차이로 정의될 수 있다.

Ⅷ. 결 론

최근 전자 교정 분야에서 많은 발전이 이루어졌다. 뛰어난 성능의 ECal 모듈 및 네트워크 분석기와 "사용자 특성분석"을 결합하여 사용함으로써 지금까지는 불가능했거나 수행하기 어려웠던 교정 기술의 새로운 지평이 열렸다. 픽스쳐 및

웨이퍼 프로브 스테이션의 교정을 단순화하는 데 ECal을 사용함으로써 이제 "꿈이 현실화되었다."

참 고 문 헌

[1] V. Adamian, *A Novel Procedure For Network Analyzer Calibration and Verification*, 41st ARFTG Conference Digest, Spring 1993, pp.8-17

[2] V. Adamian, *Electronic Calibration of a Vector Network Analyzer for Non-insertable Devices*, 43rd ARFTG Digest, Spring 1994, pp. ? ? 1-10

[3] K. Wong, R.S. Grewal, *Microwave Electronic Calibration : Transferring Standards Lab Accuracy to the Production Floor*, Microwave Journal, Sept. 1994, pp. ? ? Microwave Journal vol.37, no. 9 : 94, 98, 100, 102, 105, Sept. 1994 10

저 자 소 개

James Liu

James Liu received his BSEE degree from Georgia Institute of Technology, Atlanta, Ga in 2000. He has been with Agilent Technologies since September of 2000. His experience at Agilent includes product design, manufacturing process development, and test process development of microwave hybrid microcircuits and instruments. He has had a significant contribution to the development of the current line of E-Cal products. Currently, he is responsible for the development, design, modeling of microcircuits for Vector Network Analyzers.

Ken Wong

Ken Wong received his BSEE degree from California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA in 1972. He did some graduate level work at the University of California, Berkeley in 1976 to 1977 under the Hewlett-Packard Honor Co-Op Program. He has been with the Hewlett-Packard Company and now Agilent Technologies since July 1972. His experience at HP/Agilent includes product design, manufacturing process development, and test process development of microwave hybrid microcircuits and instruments. He worked with ATN (now part of Agilent Technologies) on the design, manufacturing and test of the original E-Cal products. Currently, he is a senior engineer responsible for the development, design, modeling, and measurement of precision microwave electronic and mechanical calibration and verification standards and calibration methodology for Vector Network Analyzers. He has published and presented many papers on VNA calibration and standards. He has served as the Vice-President, President and Treasurer of the ARFTG (Automatic Radio Frequency Techniques Group) Executive Committee. He has served as technical session chairs at the IEEE International Microwave Symposiums, and ARFTG Conference chair. He also participates in the Measurement Science Conference and the National Conference of Standard Laboratories. He is a member of the IEEE Subcommittee P287 (Standard for Precision Coaxial Connectors), MTT-12 technical committee. He is also a member of engineering honor societies - Tau Beta Pi, and Eta Kappa Nu.