벡터 전압 수신기를 이용한 2-포트 산란 계수 분석 시스템

Two-Port Vector Network Analysis System with a Vector Signal Channel

이 동 준

Dong-Joon Lee

요 약

본 논문에서는 상용 벡터 회로망 분석기를 사용하지 않고도, 신호 발생기, 벡터 전압 수신기, 방향성 결합기, 주파수 혼합기 등의 기본적인 초고주파 장비/소자를 활용하여 평가하고자 하는 초고주파 소자의 2-포트 산란 계수를 측정할 수 있는 시스템을 제안한다. 벡터 회로망 분석기를 대용할 수 있는 산란 계수 측정 시스템의 해석적 모델과 제작방법을 제시하고, 이를 1-포트와 2-포트 소자에 대하여 각각 적용한 산란 계수를 측정하여 구현된 시스템을 평가하였다. 평가 주파수 대역에 따라 비교적 낮은 대역에서는 단일 신호 발생기와 벡터 전압 수신기를 사용한 직접 수신법을, 높은 대역에서는 추가의 신호원과 주파수 혼합기를 사용하여 신호를 하향 복조하는 헤테로다인 방식을 사용하여 산란 계수를 결정짓는 벡터 전압을 수신하였다. 이들 각각의 수신 방법으로 UHF와 X 대역 초고주파 소자의 2-포트 산란 계수를 평가하였고, 그 유효성을 상용 벡터 회로망 분석기로 검증하였다.

Abstract

This paper presents a vector network analysis system for 2-port scattering parameters of microwave devices using some basic microwave instruments/devices such as signal generators, vector voltmeter, directional couplers and frequency mixers. The analytical model and implementation method for scattering parameter measurements - which can replace the vector network analyzers - are presented. The performance of the implemented system is evaluated through 1- and 2-port scattering parameter measurements, respectively. The vector volt signals which determine the scattering parameters are detected in two distinct methods depending on the frequency band of interests; a direct-detection method with a single signal generator and vector voltmeter for relatively low band and a heterodyne method to frequency down-mix associated with an additional signal source as well as frequency mixers for high band are used, respectively. Using these two methods, scattering parameters of UHF and X bands are evaluated and their performances are verified through a commercial vector network analyzer.

Key words : S-Parameter Measurement, Vector Network Analyzer, One-Path Two-Port Calibration

I. 서 론

일반적으로 초고주파 소자들의 전달 특성을 평가하기 위해서는 주파수 영역에서 산란 계수(scattering parameter)를 측정할 수 있는 장비인 벡터 회로망

분석기(Vector Network Analyzer: 이하 VNA)를 주로 사용한다. 하지만 상용 VNA의 경우, 그 시스템에 내장된 신호원의 사양에 따라 측정 가능 대역폭이 정해지게 되므로, 사용자가 측정하고자 하는 대역에 미치지 못하는 경우가 종종 있다. 이 경우, 측정하고

과학기술연합대학원대학교 측정과학부(Science of Measurement, University of Science and Technology)

· Manuscript received December 26, 2012 ; Revised March 26, 2013 ; Accepted April 9, 2013. (ID No. 20121226-140)

· Corresponding Author : Dong-Joon Lee (e-mail : dongjoonlee@kriss.re.kr)

자 하는 대역폭을 보유하는 고가의 장비 또는 모듈이 추가적으로 요구된다.

본 논문에서는 고가의 상용 VNA나 그 확장 모듈에 의존하지 않고도 자체적인 시스템을 구현하여 비교적 간단히 산란 계수를 측정할 수 있는 실용적인 모델과 시스템 제작법을 제시한다. 가장 잘 알려진 VNA의 기본 이론은 두 개의 측정 포트를 오가는 양방향성 신호의 오차를 교정(calibration)하기 위한 16항 오차 모델(16-error-term model)^[1]이 있으며, 현재 대부분의 상용 VNA에는 이를 보다 단순화한 12항 오차 모델(12-error-term model)이 일반적으로 사용된다^[2]. 이 모델을 활용한 VNA는 보다 정확하고^{[3]~[5]} 높은 주파수 대역의^[6] 회로망 분석이 가능한 방향으로 연구가 진행되고 있다.

기존 양방향 12항 오차 모델을 단방향성으로 재해석하여 5항 오차 모델로 간략화 할 수 있고^[7], 본 논문에서는 이를 헤테로다인 방식으로 활용하여 SMA 동축 케이블을 사용하는 상용 주파수 대역에서 실용적인 2-포트 VNA를 구현할 수 있는 구체적인 제작법 및 결과를 제시한다.

이해를 돕기 위해 기존 논문^[7]과 겹치는 기본적인 VNA 측정 이론들도 전반부에서 재도입하였다. 측정 이론 외에도 실제로 상용 계측기와 대등한 2-포트 결과를 얻기 위해서는 많은 측정 경험과 구체적인 시스템 구현 예가 요구된다. 본 논문에서는 BNC connection의 비교적 낮은 주파수 대역의 직접 수신 방법에 의한 시스템과 비교적 높은 주파수 대역의 SMA connection의 헤테로다인 수신 방법에 의한 시스템 구현 방법을 제시한다. 오차를 줄이기 위한(결합기, 혼합기 등의) 소자 결정 및 연결 방식, 순서, (isolator 같은) 추가 소자의 필요 여부 및 위치 등을 구체적인 시스템 구현 예를 제시한다.

시스템 구현은 2개 이하의 신호 발생기(signal generator)와 벡터 전압 수신기(Vector Voltmeter: 이하 VVM), 방향성 결합기, 주파수 혼합기와 같은 기본적인 측정 장비와 소자 등을 이용하였다. 제안된 시스템은 상용 VNA와 동일하게 1- 또는 2-포트 소자의 산란 계수를 측정할 수 있으며, 그 측정 능력을 부정합 소자를 이용한 광대역 특성 측정 결과와 공진 특성이 좋은 1 GHz 대역과 10 GHz 대역의 필터 측정 결과를 상용 VNA와 상호비교하여 나타내었다.

II. 1-포트 산란 계수 측정 시스템

본 절에서는 VNA에 있어서 가장 기본적인 요소인 반사 계수에 해당하는 1-포트 산란 계수를 측정하는 방법을 다룬다. 그림 1(a)는 1-포트 측정 시스템에 관한 블록도이며, 신호 발생기 하나와 3 dB 전력 분배기, 방향성 결합기, 벡터 전압 수신기로 구성된다. 이 시스템에서 발생한 3가지 주요 오차를 보정하기 위한 3항 오차 모델 모델을 그림 1(b)에 나타내었다.

측정 대역을 sweep 하도록 Labview 환경의 PC를 이용하여 신호 발생기의 출력과 주파수를 제어하며, 양방향성 결합기(bi-directional coupler)를 통한 위상과 진폭의 신호를 벡터 VVM에서 계측하여 PC에 저장한다. VVM은 통상 전압의 크기만을 측정하는 전압계와는 달리, 위상을 측정하기 위해서 기준 주파수의 전자파에 대한 비율을 취하여 크기와 위상을 복소수로 동시에 측정 수신하는 장비이다. 또한, 기준 주파수 성분만을 비교하기 때문에 잡음 제거 능력이 뛰어나 수신 감도가 매우 좋은 장점이 있어 벡터 회로망 분석에 널리 사용된다.

신호 발생기에서 발생한 신호는 3 dB 전력분배기를 통하여 기준 신호와 측정하고자 하는 소자에 입

그림 1. 1-포트 측정 시스템

Fig. 1. 1-port measurement system.

사되는 전력으로 분배된다. 방향성 결합기에서 측정하고자 하는 소자로 입사되는 전력은 R 포트에서 검출되며, 반사되어 돌아오는 신호는 A 포트에서 검출된다. 각각 R , A 포트에서의 신호를 위상을 포함한 복소수 형태로 얻기 위해서는 분배기로부터 분리된 기준(Ref.) 신호를 벡터 전압수신기에 연결하여 비교하고, 이를 R_{ref} , A_{ref} 로 정의한다. 측정 포트 1로부터의 반사 계수는 두 복소 신호의 비인 A_{ref}/R_{ref} 로 표현된다.

다음으로 그림 1(b)에 나타낸 것과 같이 3항 오차 모델을 이용하여 이미 특성을 알고 있는 cal. kit의 기준 반사 계수 즉 개방, 단락, 종단(open, short, load)의 반사 계수를 $\Gamma_i (i=1, 2, 3)$ 로 정의하고, 이들을 실측한 반사 계수를 Γ_{mi} 로 정의하면 다음 식 (1)로 3개의 오차 항들을 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_{00} \\ e_{11} \\ \Delta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_1 \Gamma_{m1} & -\Gamma_1 \\ 1 & \Gamma_2 \Gamma_{m2} & -\Gamma_2 \\ 1 & \Gamma_3 \Gamma_{m3} & -\Gamma_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Gamma_{m1} \\ \Gamma_{m2} \\ \Gamma_{m3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(이때 $\Delta_e \equiv e_{00}e_{11} - e_{10}e_{01}$ 이다.)

오차 항이 결정되면 측정하고자 하는 1-포트 소자의 실측한 반사 계수 Γ_m 을 식 (2)에 의해 보정된 반사 계수 Γ 로 표현할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{\Gamma_m - e_{00}}{\Gamma_m e_{11} - \Delta_e} \quad (2)$$

이 때 기준 반사 계수를 정의하기 위한 개방, 단락, 종단 N-type Cal. kit(Agilent technologies : 85054B)를 사용하였다. 이상적인 개방, 단락, 종단의 kit은 각각 1, -1, 0의 반사 계수를 가지나, 여기서는 정확한 측정을 위하여 사용주파수 대역의 실제 Cal. kit의 반사 계수 값을 사용하였다. 측정 대역은 방향성 결합기(Narda: 3020A)와 벡터 전압 수신기(HP: 8508A)로 결정되며, 이 경우 사용 장비 사양에 따라 1 GHz까지 측정이 가능하다.

시스템 검증을 위하여 3 개의 N-type 부정합기(VSWR=1.2, 1.5, 1.75)를 사용하여 1 MHz~1 GHz 까지 광대역을 1 MHz 단위로 측정한 반사 계수를 상용 VNA(Agilent Technologies: E8361C)로 측정한 값과 함께 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 나타난 결과에서 볼 수 있듯이 VVM으로 자체 구현한 시스템으로

그림 2. 부정합기(VSWR=1.2, 1.5, 1.75)의 반사 계수 크기 측정 비교

Fig. 2. $|S_{11}|$ comparison of mismatch loads(VSWR=1.2, 1.5, 1.75).

측정한 결과가 상용 VNA로 측정한 결과와 거의 전대역에서 일치함을 알 수 있다.

III. 2-포트 산란 계수 측정 시스템

앞 절에서는 VVM을 이용한 1-포트 측정 시스템에 관하여 논하였다. 본 절에서는 이를 확장하여 초고주파 소자의 전달 특성을 평가할 수 있는 2-포트 산란 계수 측정 시스템에 대하여 다룬다.

2-포트 시스템은 그림 3과 같이 1-포트 시스템에 방향성 결합기를 추가하여 구성된다. 결합기로 인하여 추가된 B-port는 2번째 포트(포트 2)의 신호 검출 역할을 한다. 또한, 결합기의 방향성 특성은 원하지 않는 역방향의 반사 신호를 차단시키는 일종의 isolator 역할도 한다.

그림 3(b)에는 2-포트 Cal.을 위한 signal flow graph에 의한 오차항 모델링을 나타내었다. 대부분의 상용 VNA에는 2-포트의 순-역방향의 양방향성 대칭성을 고려한 12항 오차 모델이 사용된다^[2]. 본 논문에서는 그림 3과 같이 신호 발생기로부터의 신호가 벡터 전압수신기로만 전달되는 단방향 시스템이므로 기존 12항 오차 모델을 6항 오차만으로 간소화할 수 있게 된다^[7]. 6개 오차항 중 isolation 항은 두 측정 포트에 측정 소자를 연결하지 않고도 두 포트 사이에 서로 결합되어 유기되는 오차를 의미한다. 이는

그림 3. 2-포트 측정 시스템
Fig. 3. 2-port measurement system.

전체 오차항 중 가장 작고, 특히 방사되는 측정 환경이 아닌 본 논문에서와 같이 두 측정 포트로부터 소자가 완전히 연결되는 guided 환경에서는 흔히 무시되는 오차로 생략하여도 무방하다.

5개 오차항 중 처음 3개는 그림 1(b)에 나타낸 1-포트 오차 모델과 동일하게 적용된다. 나머지 2개는 추가된 포트에 의해 발생하게 되는 transmission tracking error($e_{10}e_{32}$)와 port-2 mismatch error(e_{22}) 항들이며, 각각 아래의 식 (3), (4)로 나타낼 수 있다.

$$e_{22} = \frac{\left(\frac{A_{ref}}{R_{ref}}\right) - e_{00}}{\left(\frac{A_{ref}}{R_{ref}}\right) e_{11} - \Delta_e} \quad (3)$$

$$e_{10}e_{32} = \left(\frac{B_{ref}}{R_{ref}}\right) (1 - e_{11}e_{22}) \quad (4)$$

1-포트에서 결정된 3 오차항들과, 시스템의 포트 1과 포트 2 사이의 Thru를 하여 B_{ref} 를 측정하면 식 (3), (4)로 나머지 2 오차항들을 차례로 결정할 수 있다.

5개의 오차항들이 모두 결정되면 실측한 4개의 2-포트 S-parameter($S_{11m}, S_{21m}, S_{12m}, S_{22m}$)에 대한 교정이

가능하다. 포트 1~2 사이를 오가는 상용 VNA와 달리 그림 3의 시스템은 포트 1에서 포트 2로만 진행하는 단방향이기 때문에 한번에 S_{11m}, S_{21m} 만 측정이 가능하다. 반대 방향에 해당하는 S_{22m}, S_{12m} 신호는 측정 소자의 포트를 반대 방향으로 다시 연결하여 측정하면 된다. 이 방법은 상용 VNA에 비해 2번 소자를 측정해야 하는 단점이 있으나, 개방, 단락, 종단의 포트 1의 Cal. 절차를 포트 2에서 요구하지 않게 되며, 시스템과 그 수치적 Cal. 절차를 매우 간소화시키는 장점이 있다.

기존 Agilent Technologies사 VNA의 양방향성 12항 오차 모델에 사용된 해석적 수식(참고문헌 2: 6쪽 그림 5 참조)이 단방향의 5항 오차 모델로는 다음과 식 (5)~(8)과 같이 수정된다^[2].

$$S_{11} = D^{-1} \left[\left(\frac{S_{11m} - e_{00}}{e_{10}e_{01}} \right) \left(1 + \left(\frac{S_{22m} - e_{00}}{e_{10}e_{01}} \right) e_{11} \right) - \left(\frac{S_{21m} - S_{12m}e_{22}}{(e_{10}e_{01})^2} \right) \right] \quad (5)$$

$$S_{21} = D^{-1} \left[\frac{S_{21m}}{e_{10}e_{32}} \left(1 + \left(\frac{S_{22m} - e_{00}}{e_{10}e_{01}} \right) (e_{11} - e_{22}) \right) \right] \quad (6)$$

$$S_{12} = D^{-1} \left[\frac{S_{12m}}{e_{10}e_{32}} \left(1 + \left(\frac{S_{11m} - e_{00}}{e_{10}e_{01}} \right) (e_{11} - e_{22}) \right) \right] \quad (7)$$

$$S_{22} = D^{-1} \left[\left(\frac{S_{22m} - e_{00}}{e_{10}e_{01}} \right) \left(1 + \left(\frac{S_{22m} - e_{00}}{e_{10}e_{01}} \right) e_{11} \right) - \left(\frac{S_{21m} - S_{12m}e_{22}}{(e_{10}e_{01})^2} \right) \right] \quad (8)$$

여기서

$$D = \left[1 + \left(\frac{S_{11m} - e_{00}}{e_{10}e_{01}} \right) e_{11} \right] \left[1 + \left(\frac{S_{22m} - e_{00}}{e_{10}e_{01}} \right) e_{11} \right] - \left[\frac{S_{21m}S_{12m}e_{22}^2}{(e_{10}e_{32})^2} \right]$$

1-포트와 관련된 3 개의 오차항들($e_{00}, e_{11}, e_{10}e_{01}$)과 이에 추가된 2-포트로 인한 2 개의 오차항($e_{22}, e_{10}e_{32}$)이 결정된 다음, 4개의 실측한 $S_{11m}, S_{21m}, S_{12m}, S_{22m}$ 항으로 교정된 소자 고유의 S-parameter($S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$)를 계산할 수 있다.

그림 4에는 중심 주파수가 900 MHz인 maximally flat 필터의 반사와 전달 특성을 나타내는 순방향 S-parameter(S_{11}, S_{21})의 진폭과 위상 측정 결과를 나타

그림 4. 900 MHz 대역 통과 필터의 산란 계수 비교

Fig. 4. S-parameter comparison of a 900 MHz band-pass filter.

내었다. 본 논문에서 제안한 시스템과 상용 VNA로 측정된 결과를 각각 실선과 점선으로 표시하였다.

그림 4(a), (b)는 필터 S_{11} 의 진폭과 위상을 나타낸다. 두 측정 방법으로 측정된 통과 대역에서 필터의 반사량은 모두 20 dB 이하의 동일한 결과를 보인다. 통과 대역에서 4개의 공진 주파수가 측정되며, 이 공진 특성은 그림 4(b)의 위상 천이(phase transition)로 확인할 수 있다. 두 측정 시스템 모두 동일한 위상 특성 결과를 보임을 알 수 있다. 반면, 그림 4(a)의 진폭은 공진 주파수에서 약간의 편차를 보이는데, 이는 크기가 작은 반사 계수의 측정시 흔히 발생하는 현상이다. 필터 S_{21} 의 진폭과 위상은 그림 4(c), (d)에서 보듯이 잘 일치한다(noise floor 대역에서는 신호의 위상 잠금(phase-lock)이 안 되므로 임의의(ran-

dom) 위상으로 나타난다. 또한, 사용된 결합기와 VVM은 1 GHz까지 수신이 유효하므로 그 이상 대역에서는 noise floor가 다소 불안정하다.).

일반적으로 VNA의 수신 사양을 결정하는 dynamic range, min. sensitivity, trace noise 등의 사양은 사용하는 VVM의 그것에 의해 결정되고, 이 그림 4의 경우 상용 VNA와 사용한 VVM의 수신 감도가 대등함을 보인다.

IV. 헤테로다인 방식의 2-포트 산란 계수 측정 시스템

복소 신호 검출이 가능한 상용의 벡터 전압 수신기 또는 위상 잠금 수신기(lock-in amplifier)는 기술적

그림 5. 헤테로다인 방식의 2-port 산란 계수 측정 시스템

Fig. 5. 2-port S -parameter measurement system using the heterodyne scheme.

어려움으로 통상 1 GHz 이상의 대역을 지원하지 않으므로 1 GHz 이상의 주파수 대역을 측정하기 위해서는 III 절의 직접수신법을 이용하기에는 어려움이 있다.

따라서 국부 발진기(Local Oscillator: 이하 LO)를 사용하여 중간 주파수(Intermediate Frequency: 이하 IF)의 낮은 대역으로 주파수 대역을 하향 변조하는 헤테로다인 방식을 활용하면 벡터 전압수신기의 측정 범위에서 높은 주파수의 시스템 구현이 가능하다. 본 절에서는 기존 직접 수신 시스템을 헤테로다인 방식으로 10 GHz 대역으로 확장시킨 시스템을 기술한다.

그림 5는 헤테로다인 방식을 이용한 측정 대역이 향상된 시스템의 구조이다. 기존의 직접 수신 시스템에 LO용 신호 발생기 하나를 추가하여 주파수 혼합기를 통해 IF 주파수로 변환시키는 부분이 추가되었다. 그리고 측정 포트를 지난 신호와 혼합기와의 임피던스 부정합으로 인한 반사파에 의한 추가 오차를 방지하기 위해 isolator가 추가되었다. 그 외에는 직접비교 시스템과 동일한 형태를 유지하고 있다. 따라서 교정을 위한 과정도 직접 수신 시스템과 동일하게 수행하면 된다.

그림 6은 실제 사용되어진 주파수 혼합기(CER-NEX: CMB2626), 전력분배기(HP: 11667B), 방향성 결합기(RF 신호원 분배기용 - HP: 87301C, 입력/반사 신호 측정용: NARDA: 4247B-10), Isolator(DIT-OM: D3I7018)를 사용하여 구성된, RF와 LO 신호 발생기들을 연결하는 시스템이다.

시스템 평가를 위해서 중심 주파수가 10 GHz인 대역 통과 필터를 측정하였다. 이때 IF는 3 MHz로 설

그림 6. 헤테로다인 방식 산란 계수 측정 시스템의 주요 구성부

Fig. 6. Key parts of heterodyne S -parameter measurement system.

정하였으며, 앞 절에서 정의한 5항 오차로 교정을 수행하였다. 그림 7에는 헤테로다인 시스템으로 측정한 필터의 산란 계수를 상용 VNA로 측정한 결과와 비교하여 나타내었다. 두 시스템 모두 통과 대역에서 삽입 손실이 2.57 dB이었으며, 대역폭은 58 MHz로 측정되었다. 앞선 직접 수신 시스템과 마찬가지로 S_{11} 은 약간의 편차를 보이나, 공진 주파수 위치들은 모두 정확히 일치하는 것을 알 수 있다.

특히 그림 7(b)와 같은 위상 오차는 공진이 심한 대역에서 다른 계측기 간에도 발생하는 경우가 빈번한 편이다. 오차 발생의 원인은 오차항 모델 자체에 있다기보다 헤테로다인 시스템으로 구성하면서 결합기, 혼합기 등 여러 소자들을 연결한 과정에서 추가로 발생한 작은 부정합 오차로 인한 작은 신호가 공진 대역에서 비교적 크게 나타나는 것이다. 이런 오차를 수정하기 위한 수학적 모델에 의한 추가 오차항 보정보다는, isolator 추가로 여러 소자를 연결하면서 발생한 반사 loop를 제거하거나, 상용 계측기 같이 측정 소자들을 연결하는 커넥터 사용을 최소화하도록 헤테로다인부를 모듈로서 설계/구현하면 보다 정확한 측정이 가능할 것이다.

반면, 그림 7(c), (d)와 같은 대역 통과 신호에서는 미세 오차 성분보다 신호가 충분히 크므로 두 시스템이 진폭, 위상 모두 잘 일치한 결과를 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 회로망 분석기의 기본 이론을 응

그림 7. 10 GHz 대역 통과 필터의 산란 계수 비교

Fig. 7. S-parameter comparison of a 10 GHz band-pass filter.

용하여, 상용 벡터 회로망 분석기와 독립적인 시스템이면서도 동일하게 산란 계수를 측정할 수 있는 시스템을 제안하였다. 첫 번째로 회로망 분석의 기본이라 할 수 있는 3항 오차 모델의 1-포트 반사 계수 측정 시스템을 구현하였으며, 이를 임피던스 부정합기(VSWR=1.2, 1.5, 1.75)를 사용하여 광대역으로 측정하여 상용 계측기의 측정 결과가 동일함을 확인하였다. 두 번째로 2-포트 시스템으로 확장을 위하여 5항 오차 모델에 기반한 2-포트 산란 계수 측정 시스템을 제작하였고, 중심 주파수가 900 MHz인 필터를 측정하여 제작된 측정 시스템의 성능을 검증하였다. 마지막으로 높은 주파수의 초고주파 소자를 측정하기 위한 헤테로다인 방식의 시스템을 제작하였다. 성능 평가를 위해 중심 주파수가 10 GHz인 필

터를 측정하여 상용 벡터 회로망 분석기와 산란 계수 측정 결과를 비교하였다. 본 논문에서 제시한 방법은 벡터 회로망 분석기 원리 및 이해뿐만 아니라, 사용자의 사양에 맞는 자체 회로망 분석 시스템 제작에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] H. V. Hamme, M. V. Bossche, "Flexible vector network analyzer calibration with accuracy bounds using an 8-term or a 16-term error correction model", *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, vol. 42, no. 6, pp. 976-987, Jun. 1994.
- [2] "Applying error correction to network analyzer measurements", *Application Note 1287-3*, Agilent Tech-

- nologies, 1999.
- [3] L. F. Tiemeijer, R. M. T. Pijper, J. A. Steenwijk, and E. Heijden, "A new 12-term open-short-load de-embedding method for accurate on-wafer characterization of RF MOSFET structures", *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, vol. 58, no. 2, pp. 419-433, Feb. 2010.
- [4] D. F. Williams, J. C. M. Wang, and U. Arz, "An optimal vector-network-analyzer calibration algorithm", *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, vol. 51, no. 12, pp. 2391-2410, Dec. 2003.
- [5] A. Lewandowski, D. F. Williams, P. D. Hale, J. C. M. Wang, and A. Dienstfrey, "Covariance-based vector-network-analyzer uncertainty analysis for time- and frequency-domain measurements", *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, vol. 58, no. 7, pp. 1877-1886, Jul. 2003.
- [6] A. Fung, D. Dawson, L. Samoska, K. Lee, T. Gaiser, P. Kangaslahti, C. Oleson, A. Denning, Y. Lau, and Greg Boll, "Two-port vector network analyzer measurements in the 218~344- and 356~500-GHz frequency bands", *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, vol. 54, no. 12, pp. 4507-4512, Dec. 2006.
- [7] D. J. Lee, J. Y. Kwon, J. S. Kang, and J. F. Whitaker, "Vector network analysis using a one-path, frequency-multiplied photonic link", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 10, no. 4, pp. 282-289, Dec. 2010.

이 동 준

1995년 2월: 건국대학교 물리학과 (이학사)

1996년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 1월: 미국 Polytechnic Institute of New York University 전기전자공학과 (공학석사)

2008년 12월: 미국 Univ. of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)

1999년 10월~2002년 8월: 삼성전자 무선사업부 선임연구원

2009년 2월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

2012년 3월~현재: 과학기술연합대학원대학교 측정과학부 겸임부교수

[주 관심분야] 전기광학 기반 안테나 측정, 초고출력 측정용 전기광학 센서 개발, 광기반 벡터 회로망 분석기 제작, 광기반 초고속 펄스 측정 시스템 개발