G-Band 도파관 산란 계수 정밀 측정

Precise Measurements of Waveguide Scattering Parameters in G-Band

강진섭 · 김정환 · 조치현 · 김대찬

Jin-Seob Kang · Jeong-Hwan Kim · Chihyun Cho · Dae-Chan Kim

요 약

본 논문에서는 (서브)밀리미터파 대역에서 산란 계수 정밀 측정이 어려운 요인 및 보다 정확한 측정을 하기 위한 방안을 기술하였으며, G-band(140~220 GHz)에서의 측정 사례를 제시하였다. 우선 마이크로파 대역과 (서브)밀리미터파 대역에서 사용되는 산란 계수 측정시스템(벡터회로망 분석기)의 동작 원리에 대한 차이점을 파악하고, (서브)밀리미터파 대역 산란 계수 측정시스템을 보다 잘 운영하기 위한 방안을 기술하였다. 그리고 더 좋은 도파관 전송 특성 및 연결 반복도를 얻기 위한 방안과 반사 계수 크기가 작은 피측정기를 정밀 측정하기 위한 방안을 기술하였다.

Abstract

This paper discusses difficulties in precise measurements of the scattering parameters in (sub-)millimeter-wave range and tips for more accurate measurements, and provides measurement examples in the G-band(140~220 GHz). First, one investigates the differences in operating principles of scattering parameters measurement systems used in microwave and (sub-)millimeter-wave ranges and describes tips for better operation of the (sub-)millimeter-wave scattering parameters measurement system. In addition, one describes tips for better transmission properties and connection repeatability of waveguides and a precise measurement method for devices with small reflection coefficients.

Key words : Waveguide Measurement, Scattering Parameters, (sub-)Millimeter-Wave, G-Band

I. 서 론

산업사회가 정보화·고도화되면서 날로 부족해지는 전파 자원을 효율적으로 활용하고, 대용량의 다양한 정보를 빠르게 통신하려는 사용자의 요구가 커짐에 따라 무선·이동 통신시스템의 사용 주파수가 광대역화 및 고주파수화(밀리미터파 대역(30~300 GHz)으로 확산)되고 있다. 이러한 현상은 앞으로 더욱 가속화될 것으로 전망된다.

또한 정보통신뿐만 아니라 국방/보안/안전, 항공

우주, 의료, 교통, 자연과학(물리, 화학, 생물) 등의 분야가 빠른 속도로 발전하면서 전자와 관련 재료, 부품, 시스템 등의 사용이 급증하고 있어, 이에 대한 신뢰성 있는 측정 수요도 함께 증가하고 있다.

선진국의 산·학·연에서는 밀리미터파 대역뿐만 아니라, 서브밀리미터파 대역(300~3,000 GHz)에서도 첨단 전자파 측정 기술을 확보하여 차세대 통신의 원천·핵심 응용·표준화 기술 선점을 위한 연구를 활발하게 수행하고 있으며, 국방/보안/안전, 항공우주, 의료, 교통, 자연과학 등의 분야에서도 원

한국표준과학연구원 기반표준본부 전자파센터(Center for Electromagnetic Wave, Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science(KRIS))

· Manuscript received May 24, 2013 ; Revised August 20, 2013 ; Accepted September 10, 2013. (ID No. 20130524-03S)

· Corresponding Author : Jin-Seob Kang (e-mail : jinskang@kriss.re.kr)

천·핵심 응용 연구를 수행하고 있다^{[1]~[4]}.

국내 산학연에서는 주로 110 GHz까지의 측정 능력을 보유하고 있으며, 최근 들어 광대역 통신, 핵융합, 우주 전파 천문 등의 분야에서 최대 500 GHz까지의 측정 수요가 있어, 이를 지원하기 위한 전자파 정밀 측정 기술 개발 연구가 진행되고 있다.

110 GHz 이상의 (서브)밀리미터파 대역에서 전자파 정밀 측정이 용이하지 않은 주요 원인은 다음과 같다. 우선 전송 선로 측면에서 보면 저주파수 영역에서 널리 사용되고 있는 동축 선로가 110 GHz 이상의 주파수 대역에서는 상용 제품이 아직 개발되지 않아 도파관이 전송 선로로 주로 사용하고 있으나, 이 주파수 대역에서 도파관의 단면 개구면 크기가 수 mm보다 작아 원하는 신호 전송 특성 및 도파관 연결 반복도를 가지는 도파관 및 연결기(interfacing flange)를 제작하는 것이 저주파수 대역에 비해 용이하지 않다^[5]. 또한, 현재의 기술 수준으로는 (서브)밀리미터파 대역에서 저주파수 대역에 대등한 성능을 가지는 재료, 부품, 시스템 개발이 용이하지 않다.

(서브)밀리미터파 대역에서 전자파 측정 능력을 향상시키기 위해서는 전자파 분야의 주요 측정량인 산란 계수의 정밀 측정 기술 개발이 필요하다. 본 논문에서는 (서브)밀리미터파 대역에서 산란 계수 정밀 측정이 어려운 요인을 검토하고, 보다 정확한 측정을 하기 위한 방안을 기술하였으며, G-band(140~220 GHz)에서 측정 사례를 제시하였다.

본 논문에서는 우선 마이크로파 대역 및 (서브)밀리미터파 대역에서 사용되는 산란 계수 측정시스템(백터회로망 분석기)의 동작 원리에 대한 차이점을 파악하고, (서브)밀리미터파 대역 산란 계수 측정시스템을 보다 잘 운영하기 위한 방안을 기술하였다. 그리고 원하는 도파관 전송 특성 및 연결 반복도를 얻기 위한 방안을 기술하고, 반사 계수 크기가 작은 피측정기(DUT: Device Under Test)를 정밀 측정하기 위한 방안을 기술하였다.

II. 산란 계수 측정시스템의 동작 원리

산란 계수 측정시스템은 DUT에 전자파를 입사시킨 후, DUT에 의해 반사 또는 투과된 전자파를 입사 전자파(크기와 위상)와 각각 비교하여 산란 계수

그림 1. 마이크로파 대역 산란 계수 측정 시스템
Fig. 1. Microwave scattering parameters measurement system.

(반사 계수 및 투과계수)를 측정할 수 있는 전자파 분야의 핵심 계측기이다.

요즘 67 GHz 이하 주파수 대역에서 사용되는 마이크로파 대역 상용 산란 계수 측정시스템은 하나의 박스로 구성되며, 내장된 주파수 변환기를 이용하여 마이크로파 대역에서 측정된 입사, 반사, 투과 신호를 중간주파수(IF) 대역의 신호로 각각 변환한 후, 이 IF 신호들의 비로 산란 계수를 계산한다(그림 1).

그림 1은 마이크로파 대역 산란 계수 측정시스템의 IF 주파수가 12 MHz일 때 DUT의 산란 계수를 18 GHz에서 측정하는 경우를 가정한 것으로 RF 신호원에서 18 GHz의 신호를 발생시켜 동축 선로를 통해 측정단자 Port #1과 #2 사이에 위치한 DUT에 입사(a_1, a_2)시켜 DUT에 의한 반사/투과 신호(b_1, b_2)를 18+0.012 GHz의 LO 신호원의 출력 신호와 혼합하여 12 MHz의 IF 입사 신호(a_0, a_3) 및 반사/투과 신호(b_0, b_3)를 얻어 그 비로 산란 계수를 얻는 것을 보여준다.

그림 1의 마이크로파 대역 산란 계수 측정시스템과 같이 주파수 변환기가 측정시스템에 내장되어 있는 구조는 주파수가 증가하면 신호 파장이 짧아져 주파수 변환기의 단자와 DUT 사이의 전기적 거리 증가로 신호의 전송 손실이 증가하여 측정 불확도가 커짐으로 (서브)밀리미터파 대역 산란 계수 측정에는 적합하지 않다. 그러한 사유로 (서브)밀리미터파 대역 상용 산란 계수 측정시스템은 주파수 변환기의 단자와 DUT 사이의 거리를 최대한 가까이 하기 위해 67 GHz 이상의 산란 계수 측정이 외장형 주파수 변환기에서 수행되도록 구성되어 있다(그림 2).

그림 2. (서브)밀리미터파 대역 산란 계수 측정 시스템
Fig. 2. (Sub)-millimeter-wave scattering parameters measurement system.

그림 2는 (서브)밀리미터파 대역 산란 계수 측정 시스템의 IF 주파수가 12 MHz일 때 DUT의 산란 계수를 216 GHz에서 측정하는 경우를 가정한 것으로 측정시스템 본체의 RF 및 LO 신호원에서 18 GHz와 $18+0.001$ GHz의 신호를 각각 발생시켜 RF 및 LO 케이블을 통해 외장형 주파수 변환기에 공급하면 주파수 변환기는 두 신호를 12배 체배한 후 216 GHz의 RF 신호를 도파관 선로를 통해 측정단자 Port #3과 #4 사이에 위치한 DUT에 입사 (a_5, a_6)시켜 DUT에 의한 반사/투과 신호 (b_5, b_6)를 $216+0.012$ GHz의 LO 신호와 혼합하여 12 MHz의 IF 입사 신호 (a_4, a_7) 및 반사/투과 신호 (b_4, b_7)를 얻어 그 비로 산란 계수를 얻는 것을 보여준다.

그림 3은 G-band 산란 계수 측정시스템이 측정시스템 본체로서 IF 신호 수신기 역할을 하는 마이크로파 대역 벡터 회로망 분석기와 G-band 외장형 주파수 변환기 및 도파관 정렬장치로 구성되는 것을 보여준다. 한편, 산란 계수 측정 시스템을 교정하기 위해서는 임피던스 표준기로 구성되는 도파관 교정 키트(calibration kit)도 필요하다.

마이크로파 대역에 비해 (서브)밀리미터파 대역에서 사용되는 산란 계수 측정시스템의 주요 차이는 67 GHz 이상에서 산란 계수 측정에 외장형 주파수 변환기가 사용되고, 주파수 변환기의 측정단자(그림

그림 3. G-band 산란 계수 측정 시스템
Fig. 3. G-band scattering parameters measurement system.

2에서 Port #3, #4)와 DUT를 연결하기 위해 동축 선로 대신에 도파관이 사용된다는 것이다. 외장형 주파수 변환기를 사용할 때 고려해야 되는 사항들을 III장에 기술하고, (서브)밀리미터파 대역 도파관 사용할 때 고려해야 되는 사항들은 IV장에 기술하였다.

III. (서브)밀리미터파 대역 산란 계수 측정시스템 운영

일반적으로 주파수 변환기가 증폭기, 주파수 체배기 및 혼합기 등과 같은 능동기들로 구성이 됨으로, 외장형 주파수 변환기를 최적의 환경에서 동작시켜 산란 계수를 보다 정확히 측정하기 위해서는 다음 사항들을 고려하는 것이 중요하다.

- 사용하는 동안에 제작사 사양에 따라 충분하면서도 크기가 변하지 않는 RF 및 LO 신호를 주파수 변환기에 공급해야 된다. 만약 안테나 측정에서와 같이 외장형 주파수 변환기가 산란 계수 측정시스템의 본체와 멀리 떨어져 있는 경우에는 측정시스템 본체와 주파수 변환기를 연결하는 길이가 긴 RF 및 LO 케이블의 손실을 보상하기 위해 주파수 변환기의 RF 및 LO 경로에 적당한 이득을 가진 증폭기를 내장시킬 필요가 있다^[6].
- 산란 계수 측정시스템은 신호의 크기뿐만 아니라, 위상까지 측정해야 되므로 사용하는 동안에 RF 및 LO 신호의 위상 안정화가 매우 필요하다. (서브)밀리미터파 대역 주파수 변환기는 원하는 측정주파수를 얻기 위해 입력된 RF 및 LO 신호의 주파수를 여러 배 체배하므로 작은 위

그림 4. G-band 단락의 정규화된 반사 계수의 크기 반복도의 IF 대역폭 의존성

Fig. 4. Dependence of repeatability for magnitude of normalized reflection coefficient of a G-band short on IF bandwidth.

상 변화를 가진 신호도 체배하면 위상 변화가 크게 증폭된다. 따라서 산란 계수를 측정하는 동안에 RF 및 LO 케이블의 움직임을 최소화해야 되며, 가능하다면 케이블 움직임을 위상 변화가 둔감한 케이블을 사용해야 된다.

- 마이크로파 대역에 비해 (서브)밀리미터파 대역에서 사용되는 산란 계수 측정시스템의 성능이 아직 대등하지 못해 산란 계수를 정밀 측정을 위해서는 IF 대역폭을 100 Hz보다 작게 하는 것이 필요하다. 그림 4는 G-band에서 주파수 간격이 100 MHz로 설정된 교정되지 않은 산란 계수 측정시스템의 측정단자에 단락(short)을 연결한 상태에서 IF 대역폭을 100 Hz에서 1 MHz 까지 변화시키면서 측정된 반사 계수 크기를 IF 대역폭이 10 Hz일 때 얻은 것으로 정규화한 후 그 최대 차이를 IF 대역폭에 대한 함수로 제시한 것으로 측정 반복도가 약 0.02 dB보다 좋기 위해서는 IF 대역폭이 100 Hz보다 작아야 됨을 보여 준다.
- 능동기기의 산란 계수를 측정하는 경우, 크기가 큰 입력신호에 의한 능동기기의 포화, 고 출력신호에 의한 수신측 주파수 변환기의 파손을 방지하기 위해 주파수 변환기의 RF 신호 경로에 수동 가변 감쇠기를 내장시킬 필요가 있다^[6].
- 낮은 주파수(예를 들어 10 GHz)에 비해 높은 주파수(예를 들어 40 GHz)의 RF 및 LO 신호를 사용하는 주파수 변환기의 경우, 적게 체배하고도

원하는 높은 측정주파수에서 크기가 큰 출력 신호를 얻을 수 있어 보다 넓은 측정 범위(dynamic range)를 가질 수 있으나, 측정시스템 본체와 주파수 변환기를 연결하는 RF 및 LO 케이블에 높은 주파수의 신호가 전달되므로, 낮은 주파수의 신호를 사용하는 경우에 비해 측정과정에서 이들 케이블의 움직임에 더 많이 영향을 받을 수 있고, 전송손실이 크다는 단점을 가져, 길이가 긴 RF 및 LO 케이블을 사용하는 안테나 측정에는 적합하지 않을 수 있다^[6].

IV. (서브)밀리미터파 대역 도파관

도파관의 연결부(flange)에 대한 이상적인 요건은 다음과 같다.

- 도파관 단면의 개구면 형상은 그림 5의 왼쪽 그림과 같이 폭에 대한 높이의 비(aspect ratio)가 2:1인 직사각형으로 그 모서리가 정확히 직각이 되어야 한다(예를 들어 G-band 도파관 단면의 개구면 크기는 1.296 mm×0.648 mm 임(그림 6)).
- 도파관 개구면의 좌표계가 연결부의 정렬 핀에 대해 정의되는 좌표계와 정확히 일치해야 된다.

(a) 이상적인 형상
(a) Ideal

(b) 모서리가 둥근 형상
(b) Rounded

그림 5. 도파관 단면

Fig. 5. Waveguide cross-section.

그림 6. 정렬 핀을 가진 범용 G-band 도파관의 연결부(UG-387/U)

Fig. 6. Flange of a general-purpose G-band waveguide with alignment pin.

현재의 도파관 제작 기술로는 마이크로파 대역용 도파관 제작에는 문제가 없으나, 단면의 개구면 크기가 수 mm보다 작은 (서브)밀리미터파 대역용 도파관에 대해서는 제작 능력의 한계로 인해 모서리가 둥글며, aspect ratio가 2:1인 직사각형에 가까운 형상을 가진다(그림 6의 오른쪽 그림). 현재 (서브)밀리미터파 대역 도파관의 연결부에 대한 표준화 연구가 활발히 수행되고 있다^[7]. 한편, (서브)밀리미터파 대역용 도파관 제작에는 이상적인 도파관 단면의 개구면 형상을 얻기 위해 전기주조(electro-forming) 기법이 사용되고 있다.

한편, 이상적인 개구면 단면 형상을 가진 도파관을 사용하더라도 (서브)밀리미터파 대역용 도파관 단면의 개구면 크기가 매우 작고, 연결부 정렬핀의 위치 부정확성 및 유격에 의해 두 도파관을 연결할 때 그림 7에서와 같은 문제가 발생할 수 있어 두 도파관을 정확히 정렬하여 연결하는 것이 용의하지 않다^{[5],[8]}. 그림 8은 G-band에서 주파수 간격이 100 MHz로 설정되고, 1-port 교정된 산란 계수 측정시스템의 측정 단자에 단락을 180°씩 8번 회전(Up-1,2,3,4 / Down-1,2,3,4)시키면서 연결하여 측정된 반사 계수 크기를 Up-1에 대해 측정된 것으로 정규화하여 얻은 Up-2,3,4와 Down-2-3-4를 제시한 것으로 측정 편차가 약 0.03 dB 정도임을 보여 준다.

보다 정확하게 두 도파관을 연결하기 위한 방안은 다음과 같다.

그림 7. 두 도파관의 정렬 틀어진 연결
Fig. 7. Misaligned connections of two waveguides.

그림 8. G-band 단락의 정규화된 반사 계수 크기의 반복도

Fig. 8. Repeatability for magnitude of normalized reflection coefficient of a G-band short.

- 그림 6의 도파관의 경우 90° 간격으로 배치된 4개의 나사를 사용하여 두 도파관을 연결한다. 만약 4개의 나사 중 한쪽의 나사를 너무 강하게 조이면 반대쪽의 도파관 연결부가 벌어지게 되므로 4개의 나사를 일정한 힘으로 대각선 방향으로 번갈아가며 조이는 것이 필요하다. 이 문제를 해결하기 위해서는 도파관 연결부의 외곽 테두리를 개구면과 같은 높이로 제작된 anti-cocking 형태의 연결부를 가진 도파관을 사용하는 것이 바람직하다(그림 9).
- 연결부 정렬핀만으로 두 도파관 단면의 개구면을 정렬하는 것이 용이하지 않으므로 도파관 개구면 상하에 index 핀을 추가한 정밀급 연결부를 가진 도파관도 사용되고 있다(그림 9).
- 도파관을 연결하기 위해서는 사전에 두 도파관의 단면 개구면을 정렬시킬 필요가 있다. 이 경우, 직사각형 형상의 판을 두 개구면에 각각 부

그림 9. Index 핀/홀을 가진 anti-cocking 형태의 정밀급 G-band 도파관의 연결부(UG-385/U)

Fig. 9. Flange of an anti-cocking precision G-band waveguide with index pin/hole.

(a) 도파관 정렬
(a) Waveguide alignment

(b) Clamp을 사용한 도파관 연결
(b) Waveguide connection using clamp

그림 10. G-band 도파관의 정렬 및 연결
Fig. 10. Alignment and connection of G-band waveguides.

착한 후 두 직사각형의 모서리를 서로 일치시키면 보다 용이하게 두 도파관을 정렬할 수 있다(그림 10(a)).

일반적으로 나사를 사용하여 도파관을 연결하나, 좁은 공간에서 도파관을 연결하거나 좋은 연결 반복도를 확보하기 위해 일정한 힘으로 도파관을 연결하기 위해서는 클램프를 사용하는 것이 보다 유용하다(그림 10(b)).

V. 크기가 작은 반사 계수 정밀 측정

산란 계수 측정시스템의 교정법 중에서 상대적으로 사용하기는 용이하나, 1-port 교정법(OSL: Open-Short-Load)이 2-port 교정법인 TRL(Thru-Reflect-Line) 교정법^[9]보다 반사 계수 크기가 작은 DUT에 대한 측정정확도가 떨어지는 주요 요인은 1-port 교정 과정에 사용되는 부하(load)의 실제 특성값을 사용하지 않고, 반사 계수 크기를 영으로 가정하기 때문이다. 만약 특성을 알고 있는 부하를 사용하여 산란 계수 측정시스템을 1-port 교정하여 사용한다면, 복잡한 2-port 교정을 하지 않고도 반사 계수 크기가 작은 DUT에 대해 비교적 신뢰성 있는 측정값을 얻을 수 있다.

G-band에서 타당성을 보이기 위해 그림 11에서

그림 11. TRL 및 교정되지 않은/교정된 부하를 사용한 1-port 방법으로 교정된 산란 계수 측정시스템으로 측정된 G-band 이동부하의 반사 계수 크기 및 크기 차이

Fig. 11. Magnitudes and their difference of the reflection coefficients of a G-band sliding load using a vector network analyzer calibrated by TRL and one-port calibration method(OSL) with a uncalibrated/calibrated loads, respectively.

TRL 법으로 교정된 산란 계수 측정시스템으로 측정된 부하의 값을 사용하여 산란 계수 측정시스템을 1-port 교정한 후 측정된 이동 부하(sliding load)의 반사 계수(그림 11에서 #2)와 TRL 법으로 교정된 산란 계수 측정시스템으로 측정된 동일한 이동 부하의 반사 계수(#3)를 비교하여 보았다. 참고로 반사 계수 크기를 영으로 가정한 부하를 사용하여 산란 계수 측정시스템을 1-port 교정하고 얻은 결과(#1)도 그림 11에 함께 보였다. 일반적으로 주파수가 증가하면 동축형 기기의 경우 측정불확도가 증가하나, 도파관형 기기의 경우 반대로 측정불확도가 감소한다. 측정 결과, 반사 계수의 크기 차이(#4)는 같은 경향을 보이고 있으며, 약 0.002보다 작았다(그림 11).

VI. 결 론

본 논문에서는 (서브)밀리미터파 대역에서 전자파 분야의 주요 측정량인 산란 계수를 정밀 측정하기 어려운 주요 원인을 검토하고, 이들을 극복하기 위한 방안을 기술하고, G-band(140-220 GHz)에서 측정 사례를 제시하였다.

우선 마이크로파 대역 및 (서브)밀리미터파 대역에서 사용되는 산란 계수 측정시스템의 동작 원리에 대한 차이점을 파악하고, (서브)밀리미터파 대역 산

란 계수 정밀 측정을 위해 외장형 주파수 변환기 및 도파관 사용할 때 고려해야 되는 사항들을 기술하였다. 그리고 특성을 알고 있는 부하를 산란 계수 측정 시스템의 1-port 교정에 사용하여 반사 계수 크기가 작은 피측정기를 정밀 측정하기 위한 방안을 기술하였다.

향후 (서브)밀리미터파 대역에서 산란 계수를 정밀 측정할 때 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] S. Priebe, D. M. Britz, M. Jacob, S. Sarkozy, K. M. K. H. Leong, J. E. Logan, B. S. Gorospe, and T. Kürner, "Interference investigations of active communications and passive earth exploration services in the THz frequency range", *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 2, no. 5, pp. 525-537, Sep. 2012.
- [2] A. Tang, M. F. Chang, "Inter-modulated regenerative CMOS receivers operating at 349 and 495 GHz for THz imaging applications", *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 134-140, Mar. 2013.
- [3] A. Karttunen, J. Ala-Laurinaho, M. Vaaja, T. Koskinen, J. Häkli, A. Lönnqvist, J. Mallat, A. Tamminen, V. Viikari, and A. V. Räisänen, "Antenna tests with a hologram-based CATR at 650 GHz", *IEEE*

Trans. Antennas Propag., vol. 57, no. 3, pp. 711-720, Mar. 2009.

- [4] Y. Fujii, A. Gonzalez, M. Kroug, K. Kaneko, A. Miyachi, T. Yokoshima, K. Kuroiwa, H. Ogawa, K. Makise, Z. Wang, and Y. Uzawa, "The first six AL-MA band 10 receivers", *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 39-49, Jan. 2013.
- [5] Making Connections Beyond 110 GHz, *Microwave Journal*, pp. 22-42, Feb. 2013.
- [6] 강진섭, 김기채, "밀리미터파 대역 산란 계수 및 안테나 특성에 대한 측정 기술 개발과 연구 동향", *한국전자과학회지 전자파기술*, 24(3), pp. 12-21, 2013년 5월.
- [7] IEEE P1785 Working Group: "Waveguides for millimeter and sub-millimeter waveguides", <http://group.ieee.org/groups/1785>.
- [8] D. F. Williams, "500~750 GHz rectangular-waveguide vector-network-analyzer calibrations", *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 364-377, Nov. 2011.
- [9] G. F. Engen, C. A. Hoer, "Thru-Reflect-Line: an improved technique for calibrating the dual six-port automatic network analyzer", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-27, no. 12, pp. 987-993, Dec. 1979.

강 진 섭

1987년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1994년 3월~1995년 3월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 위촉

연구원

1995년 3월~1996년 2월: University of Illinois at Urbana-Champaign Postdoctoral Research Associate

1996년 3월~1998년 2월: 충북대학교 전기전자공학부 초빙조교수

1998년 3월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정, 전자파 산란 및 역산란 등

김 정 환

1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1980년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1981년 10월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파측정표준(RF 전압, 전력, 안테나, 물질상수 등)

조 치 현

2004년 2월: 홍익대학교 전자전기
제어공학과 (공학사)
2006년 2월: 홍익대학교 전파통신
공학과 (공학석사)
2009년 2월: 홍익대학교 전자정보
통신공학과 (공학박사)
2009년 2월~2012년 5월: 삼성탈레

스 전문연구원

2012년 6월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 선임
연구원

[주 관심분야] 전자파 측정 표준, 초고주파 회로 및 안테
나 설계

김 대 찬

1988년 2월: 대전공업대학교 전자
공학과 (공학사)
1988년 7월~현재: 한국표준과학연
구원 전자파센터 선임기술원
[주 관심분야] 전자파 임피던스 및
전자기장세기 측정 등