2 포트 VNA를 이용한 멀티포트 S-parameter 변환에 관한 연구

김종민, 황보훈, 심민규, 설병수*, 이종성*, 이형석*, 나완수
성균관대학교 정보통신공학부, 삼성전자*

Transfer characteristics measurement of multi-port system using two-port Network Analyzer

Jongmin Kim, Hoon Hwangbo, Minkyu Shim, Byungsoo Seol, Jongsung Lee, Hyungsuk Lee, Wansoo Nah
School of Information and Communication Engineering Sungkyukwan University, Samsung Electronics

Abstract - In this paper, we study the algorithm for the multiport measurements using the 2port VNA(Vector network Analyzer). We explain the conversion algorithm which the open impedance to the matched impedance(50 ohm), and then we apply this algorithm to the 4 port VNA measurement. Finally, we discuss the reliability of this algorithm.

1. 서 론

S 파라미터를 측정하기 위한 고주파 측정기(VNA : Vector Network Analyzer)는 대부분 2포트로 구성되어져 있다. 하지만 패키징 시스템의 멀티 포트에 관한 측정이나, Coupled 된 여러 마이크로 스트립 라인의 Crosstalk에 대한 현상의 분석을 위해 멀티포트의 S 파라미터를 측정하기 위해서는 많은 비용과 어려움이 따른다. 즉 2포트 VNA(Vector Network Analyzer)를 이용, 멀티포트를 측정하기 위해서는 각 포트에 대해 50Ω으로 매칭된 상태에서 S 파라미터의 측정이 이루어져야 한다. 하지만 패키징 시스템에서 이용하는 프로빙을 통한 S 파라미터의 측정이나 많은 멀티 포트의 측정 시에서는 각 포트에 대한 50Ω 매칭이 현실적으로 어려우므로 오픈 포트에 대해 임피던스를 50Ω으로 변환하는 알고리즘이 필요하다.

이에 본 연구에서는 멀티포트를 측정하기 위한 임피던스 변환 알고리즘에 대해 제시를 하고 시뮬레이션으로 추출된 S 파라미터의 임피던스 변환을 확인한다. 또한, 실제 4포트 시스템을 제작, 4포트 VNA(Vector Network Analyzer)로 측정된 결과와 임피던스 변환으로 통해 추출된 S 파라미터의 결과를 비교하여 변환 알고리즘의 적합성 및 Open 임피던스의 주파수 특성의 관계를 알아보고자 한다.

2. 본 론

2.1 임피던스 변환 알고리즘

2N 멀티 포트 시스템에 대한 S-parameter 측정을 하기 위해서는 수식 2.1과 같이 행렬이 구성된다.[1]

$$\overline{\overline{S}}_t = \left[\overline{\overline{T}}\left(\overline{\overline{Z}}^* + \overline{\overline{Z}}_t\right) + \overline{\overline{ST}}\left(\overline{\overline{Z}}^* - \overline{\overline{Z}}_t\right)\right]^{-1}\left[\overline{\overline{T}}\left(\overline{\overline{Z}}^* - \overline{\overline{Z}}_t^*\right) + \overline{\overline{ST}}\left(\overline{\overline{Z}} - \overline{\overline{Z}}_t^*\right)\right]$$

여기서

$$\overline{\overline{T}} = diag\left[\frac{1}{\sqrt{R_k R_{tk}}}\right], \quad R_k = \mathrm{Re}(Z_k), \quad R_{tk} = \mathrm{Re}(Z_{tk})$$

$$\overline{\overline{Z}} = diag\left[Z_k\right]$$

$$\overline{\overline{Z}}_t = diag\left[Z_{tk}\right]$$

$$\overline{\overline{Z}}^* = \text{complex conjugate of } \overline{\overline{Z}}$$

< 수식 2.1 임피던스 변환 행렬 >

수식 2.1을 이용하여 멀티 포트에 대한 측정을 설명하기 위해서 4포트 시스템의 변환을 예로 들어 설명하고자 한다. 우선 4포트 시스템에서 1과 2 포트에 대해서 측정하고 수식 2.1을 이용하여, 포트 1과 2를 Open 임피던스로 변환하기 위해 아래의 수식과 같이 행렬을 구성한다.

$$\overline{\overline{S}}(50,50) \rightarrow \overline{\overline{S}}(z_i, z_j)$$

$$\overline{\overline{S}}_t = \left[\overline{\overline{T}}\left(\overline{\overline{Z}}^* + \overline{\overline{Z}}_t\right) + \overline{\overline{ST}}\left(\overline{\overline{Z}}^* - \overline{\overline{Z}}_t\right)\right]^{-1}\left[\overline{\overline{T}}\left(\overline{\overline{Z}}^* - \overline{\overline{Z}}_t^*\right) + \overline{\overline{ST}}\left(\overline{\overline{Z}} - \overline{\overline{Z}}_t^*\right)\right]$$

$$\overline{\overline{T}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{50R_1}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{50R_2}} \end{bmatrix}$$

$$\overline{\overline{Z}} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \qquad \overline{\overline{Z}}_t = \begin{bmatrix} z_1 & 0 \\ 0 & z_2 \end{bmatrix}$$

이때 측정된 S 파라미터는 임피던스 50Ω에서 Z_1과 Z_2에 관해 변환이 되며, 측정기와 연결되지 않은 다른 포트들에 대해서는 Open 상태이므로 임피던스를 무한대로 가정하고 변환을 한다.

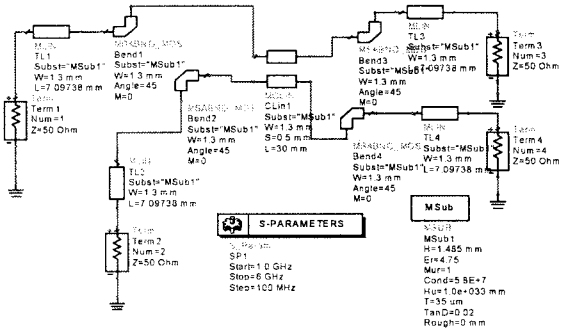
이후 포트 1와 3, 포트 1와 4, 포트 2와 3, 포트 2와 4, 포트 3와 4에 대해서 다음과 같은 과정을 반복한 후 Open 변화에 대한 4포트 시스템 행렬을 구성한다. 그리고 행렬 [T]와 [Z], [Z_t]는 아래와 같이 구성한 후에 수식 2.1을 이용해서 ∞에서 50Ω으로 변환하여 멀티 포트 측정을 한다.

$$\overline{\overline{T}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{z_1 \times 50}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{z_2 \times 50}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{z_3 \times 50}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{z_4 \times 50}} \end{bmatrix} \quad \overline{\overline{Z}} = \begin{bmatrix} \infty & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \infty & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \infty & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \infty \end{bmatrix}$$

$$\overline{\overline{Z}}_t = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50 \end{bmatrix}$$

2.2 ADS를 이용한 시뮬레이션 변환 결과

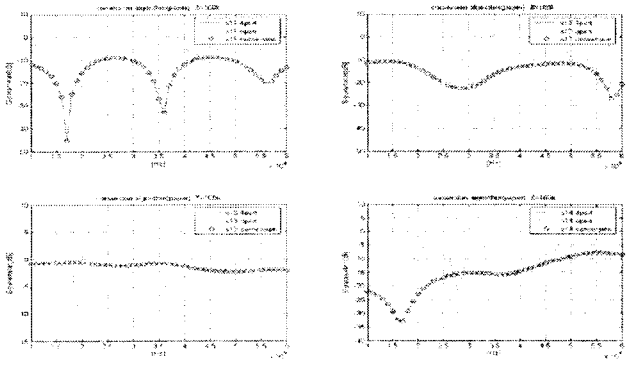
수식을 이용하여 임피던스의 변환 여부를 확인하기 위해서 Agilent사의 ADS(Advanced Design System)을 이용해서 4포트 시스템의 시뮬레이션 모델을 그림 2.1과 같이 구성하였다.



<그림 2.1> 4포트 시스템의 ADS 구성

그림 2.1의 시스템에서 계측기에 연결되지 않은 포트의 Open 임피던스를 100kΩ이라고 가정을 하며, 각 모델에 대한 S 파라미터를 추출하였다.

이때 임피던스 변환 알고리즘에 적용하여 측정된 S 파라미터와 4포트 임피던스 50Ω 매칭된 S 파라미터의 결과를 그림 2.2에 도시 하였다.

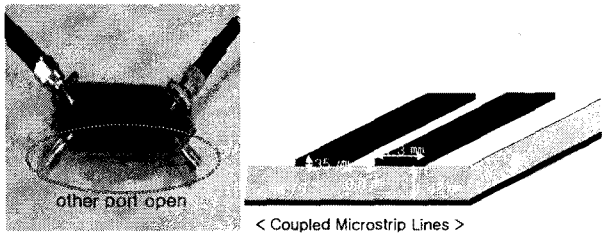


<그림 2.2> 임피던스 100kΩ 변환 결과

그림 2.2에서 보듯이 100kΩ의 변환에 관해서는 완벽하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

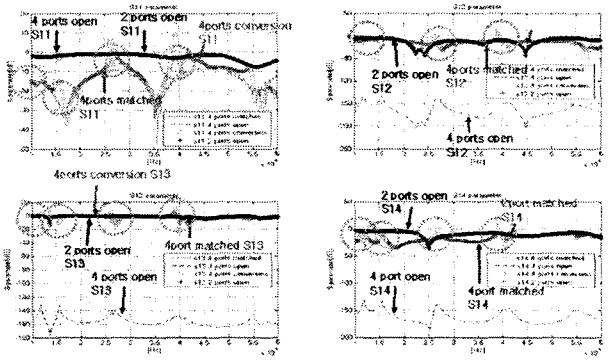
2.3 측정결과를 이용한 임피던스 변환

실제 측정에도 이용할 수 있는지를 확인하기 위해서 그림 2.3과 같이 폭 1.3㎜, 길이 30㎜, 유전율 4.75, 손실률 0.02인 마이크로 스트립 4포트 시스템을 제작하였다.



<그림 2.3> 제작 규격 및 측정 샘플의 모습

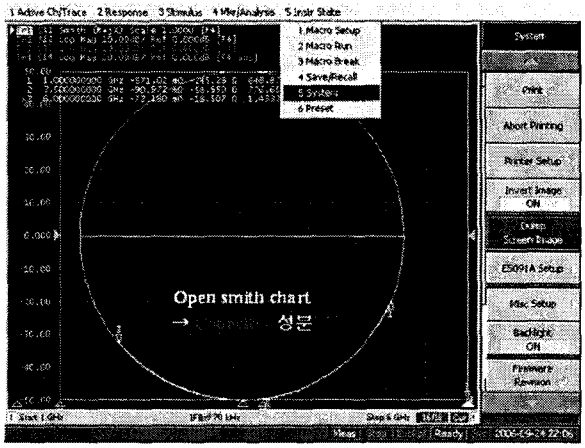
그림 2.3과 같이 제작된 샘플을 Agilent사의 E5071B 4포트 VNA를 이용한 측정결과와 Agilent사의 E8364B PNA를 이용해서 측정한 결과를 임피던스 ∞를 10^10으로 가정하여 50Ω으로 변환한 결과가 그림 2.4에 나타내고 있다.



<그림 2.4> 측정 임피던스 변환 결과

그림 2.4에서 보듯이 다른 포트를 Open 상태로 놓고 측정한 결과의 변환 결과와 E5071B 4포트 VNA를 이용해서 측정한 결과와 거의 양상은 비슷하나, 특정 주파수 대역에서 측정된 결과가 튀는 현상이 발생하였다.

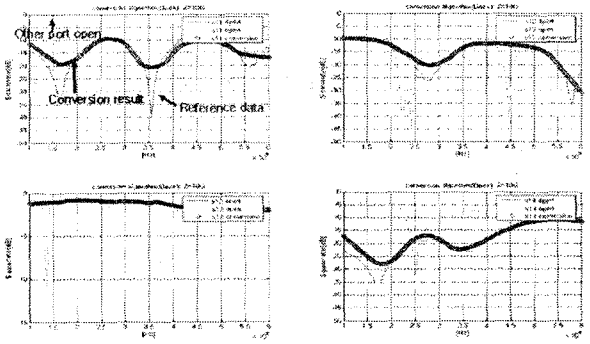
이는 처음에 가정한 Open 임피던스가 완벽한 ∞가 아니라는 의문을 가지게 되었고, Open 임피던스에 대한 확인을 위해 SMA 커넥터의 Open 임피던스를 1포트 측정한 결과가 그림 2.5와 같이 스미스 차트 상에서 캐패시턴스 성분을 나타내고 있음을 알 수 있다.



<그림 2.5> 1포트 Open 측정 결과

위의 결과에서 보듯이 측정 외 포트의 Open은 무한대의 임피던스를 가지는 Open이 아니라 주파수에 의존하고 있다는 것을 알 수 있었고 이는 Open이라고 가정한 커패시턴스 성분에 의해 임피던스가 특정 주파수 대역에서 변화한다는 것을 유추할 수 있었다. 즉 위의 알고리즘을 완벽하게 적용하기 위해서는 Open 임피던스에 대한 완벽한 정의의 필요성을 알 수 있다.

이에 본 연구에서는 특정 주파수 영역에 대해 임피던스의 변화에 따라 튀는 현상을 변환된 데이터의 평균값에 대한 오차 보정 방식을 적용하여 특정 주파수 대역에서의 임피던스 변화에 대한 튀는 현상을 보정하였고, 그 결과가 그림 2.6과 같이 나타내고 있다.



<그림 2.6> 보정후 임피던스 변환 결과

데이터의 평균값에 대한 오차보정 방식을 이용해서 보정된 S 파라미터 변환 결과는 반사특성인 S11의 결과는 E5071B 4포트 VNA의 측정결과의 공진점 부분까지는 완벽하게 따라가지는 못하지만, 통과특성인 S13에 대해서는 거의 완벽하게 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 2포트 계측기를 이용하여 멀티 포트를 측정하기 위해 Open 포트의 임피던스를 50Ω 변환을 통해 멀티포트의 측정에 대한 알고리즘 및 실제 적용 예를 보여주었다. 또한 확장된 멀티포트 S 파라미터 측정을 위해서는 단지 구성 행렬의 차수를 높임으로서 쉽게 변환이 가능하다는 것을 알 수 있다. 하지만, 멀티포트 측정을 위한 임피던스 변환 알고리즘 적용 시 특정 주파수 내에서 튀는 현상이 발생 하였는데 이는 주파수 변화에 따른 Open 상태가 단지 ∞ 임피던스 성분만을 가지는 것이 아닌 특정 주파수내에서 의존적인 임피던스를 가지고 있음을 알 수 있다. 이의 주파수에 따른 Open 임피던스의 정의가 중요하며, 본 연구에서는 추세곡선에 대한 오차보정 방식을 적용하여, 특정 주파수에 대한 튀는 현상을 보완하여 본 멀티 포트 측정을 위한 알고리즘을 제시하였지만, 보다 정확한 멀티 포트에 대한 측정을 위해서는 Open 임피던스에 대한 주파수와의 관계의 규명이 필요하다.

[참 고 문 헌]

[1] Luc Martens, "High-Frequency characterization of Electronic packaging", p89~p95, 1998

[2] J. C. Tippet, and R. A. Speciale, "A Rigorous Technique for Measuring the Scattering Matrix of a Multiport Device with a 2-port Network Analyzer", IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol.30, no.5, p661~p666, 1982

[3] S. Sercu, and L. Martens, "Characterizing N-port Packages and Inter connections with a 2-port Network Analyzer", Proc. of 6th Top

[4] Ilona Rolfes and Burkhard Schiek, "Multiport Method for the Measure ment of the scattering parameters of N-ports", IEE Transactions on Microwave theory and Techniques, Vol. 53, No.6, June 2005

[5] Alain M. Mangan, "De-Embedding transmission line measurements for accurate modeling of IC Designs, IEEE Transactions on Electron Dev ices, Vol. 53, No. 2, February 2006

[6] Roger B. Marks, "Characteristic Impedance Determination using propa gation constant measurement." IEEE Microwave and Guided wave let ters, Vol. 1, No. 6, June 1991

[7] William R. Eisenstadt, "S-parameter-based IC interconnect transmissi on line Characterization", IEEE Transactions on components, Hybrids, and manufacturing technology, Vol 15, No. 4, August 1992