

마이크로파 소자 특성화를 위한 새로운 보정 방법 (A New Calibration Method for the Characterization of Microwave Devices)

신 현 철* · 유 영 길* · 정 의 봉* · 이 종 악*
(Hun Cheol Sin, Yeong Kil Yoo, Eui Bung Jeong, Jong Arc Lee)

要 約

마이크로파용 소자를 측정하기 위해서 test fixture를 이용하는데, 소자 특성화에 앞서 측정시스템과 test fixture에 따른 오차회로망을 우선적으로 보정하여야 한다. 본 논문에서는 길이가 다른 두개의 보정용 마이크로 스트립 선로만으로 오차회로망을 특성화하는 방법을 제시하였다. 보정용 두 선로의 길이가 정확히 주어진다면, 전파상수의 지식없이도 정확한 보정 데이터를 제공할 수 있다. 보정용 선로 제작시 end effect를 전혀 고려할 필요가 없다. 이 방법에 의한 보정작업에 따라 ATF13736 MESFET를 특성화 하였다. 측정주파수 범위는 2-18 GHz이고, 바이어스는 $V_{DS}=2.5V$, $I_{DS}=20mA$ 이었다. 보정데이터와 데이터 용지를 비교할 때, 상대적으로 낮은 주파수에서 그 크기는 거의 일치하고 단지 $0.1^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 의 위상차를 보였다.

ABSTRACT

The error networks due to the measuring systems and the test fixture must be previously calibrated in order to characterize the microwave devices. In this paper, it is presented a new method to characterize the error networks in which only two different microstrip lines are used for the calibration. Once each length of two calibrating microstrip lines is accurately defined, the calibrated data can be easily obtained without acknowledgement for the propagation constant. The end effect is not considered when fabricated the microstrip lines used to calibration. The ATF13736 GaAs MESFET is characterized by means of the calibrating procedure with this method. The range of measuring frequency is 2 to 18 GHz, and the bias voltage and current are $V_{DS}=2.5V$, $I_{DS}=20mA$, respectively. Compared the calibrated data with data sheet, it is showed that the magnitude is nearly agreed with each other and the phase is deviated by 0.1 to 12 degrees in lower frequencies.

I. 서 론

MIC(Microwave Integrated Circuit), 마이크로파용 능동소자(HEMT, MESFET) 또는 수동소자 등을 특성화하기 위해서는 측정 시스템(Network Analyzer 등)과 test fixture 등이 필요하다. 그런데 이들 시스템으로 인한 오차와 특성화하려는 소자

들에 추가되는 회로망, 즉 embedding network에 의한 추가적인 성분이 포함된다^{1,2,3,4,5}. 따라서 소자들만의 특성화를 위해서는 시스템 오차나 embedding network에 대한 보정작업이 반드시 이루어져야 한다^{6,7,8}. 이를 위한 방법은 여러가지가 제시되어져 왔다. 기존의 OSL 방법은 마이크로스트립의 정확한 open, short 및 50Ω 정합이 어렵기 때문에 사용하기 힘들고⁹, 또 다른 방법으로 TSD(Through-Short-Delay) 방법은 역시 정확한 short를 제작하기 어렵다¹⁰. 그리고 TRL(Trough-Reflect-

* 正會員, 建國大學校 電子工學科
(Detp. of Electronic Eng., Konkuk Univ.)

Line) 방법은 thru를 제작하기 어렵기 때문에 역시 보정작업의 방법으로 채택하기가 힘들다^{11,12)}. 한편 TRL방법과 유사한 LRL(Line-Reflect-Line) 방법은 두개의 선로이외에 별도로 reflect를 제작하여야 하는 번거로움이 있다^{13,14)}. 그외에도 Meys가 제안한 3개의 through를 이용한 test fixture 특성화 방법이 있는데¹⁵⁾, 이 방법은 대칭구조를 지닌 fixture에 대한 방법으로, 아무리 fixture를 정교히 제작하더라도 정확한 대칭구조를 지니기 힘들기 때문에 이 방법 또한 비현실적이다.

본 논문에서는 정확한 길이의 두 마이크로스트립 선로만으로 전파상수의 지식없이 보정작업을 할 수 있는 방법을 제시하였다.

II. 오차항 보정

1. 오차회로망 표현

측정시스템과 test fixture에 따른 오차회로망을 X와 Y 2단자 회로망이라고 하면, 이를 그림1과 같이 표현할 수 있다.

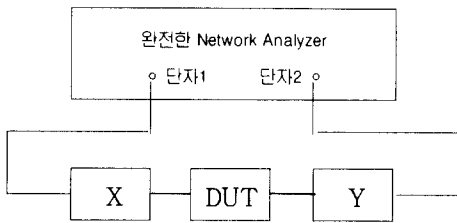


그림 1. 측정시스템 및 Test Fixture에 따른 오차회로망
Fig 1. Error network due to the measuring system and test fixture

특성화하고자 하는 소자(DUT)를 정확히 측정하기 위해서는 먼저 오차회로망 X 및 Y를 특성화하여야 한다. 일단 오차회로망이 특성화되면, 이 오차회로망이 포함된 소자의 측정치에서 이들 오차회로망의 데이터 값을 제거시켜 주면 소자를 정확히 특성화할 수 있다.

2. 오차회로망에 대한 특성화

길이가 서로 다른 마이크로스트립 선로 두개를 제작하여, 이 선로들을 이용하여 오차회로망을 특성화할 수 있다. 이 선로들이 각각 test fixture에 연결

된 상태를 그림 2에 나타내었다.

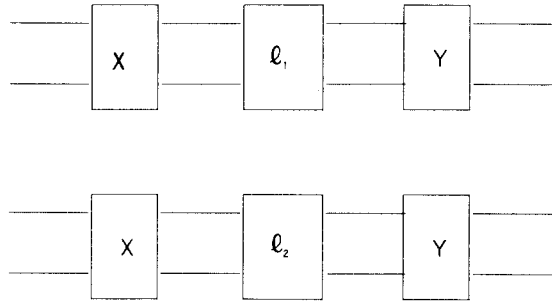


그림 2. Test Fixture에 연결된 길이 l_1, l_2 인 마이크로 스트립 선로

Fig 2. Microstrip l_1, l_2 connected to the test fixture, respectively

오차 회로망과 DUT의 S-parameter를 신호 흐름도로 표현하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

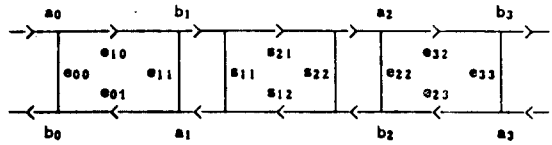


그림 3. 오차 회로망과 DUT의 신호 흐름도

Fig 3. The signal flow graph of the DUT included error network

이때,

e_{00}, e_{33} : 각각 단자1과 단자2의 지향성 오차
 e_{11}, e_{22} : 각각 단자1과 단자2의 단자정합에 따른 오차

$e_{10}e_{01}, e_{23}e_{32}$: 반사 주파수 응답

$e_{10}e_{32}, e_{23}e_{01}$: 전송 주파수 응답

$S_{11D}, S_{12D}, S_{21D}, S_{22D}$: DUT의 S-parameter

오차 회로망에 대한 오차항들을 구하기 위해 각 S-parameter를 R행렬식으로 표현하면 보다 간단하다. R행렬과 S행렬의 관계는 다음과 같다.

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{S_{21}} \begin{bmatrix} S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22} & S_{11} \\ -S_{22} & 1 \end{bmatrix}$$

오차 행렬식을 각각 R_x 와 R_y 라고 하면,

$$R_x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{10}} \begin{bmatrix} e_{10}e_{01} - e_{00}e_{11} & e_{00} \\ -e_{11} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{32}} \begin{bmatrix} e_{32}e_{23} - e_{22}e_{33} & e_{22} \\ -e_{33} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

DUT를 포함하여 전체 측정된 것을 R_{TOT} 라고 하면,
 $R_{TOT} = R_x R_{\ell_1} R_s R_{\ell_1} R_y$ (3)

이때, R_s : DUT의 R-parameter

R_{ℓ_1} : 길이 ℓ_1 인 마이크로스트립 선로의 R-parameter

길이 ℓ_1 인 선로를 test fixture에 연결하여 측정된 것을 R_{m1} 이라 하면,

$$R_{m1} = R_x R_{\ell_1} R_y \quad (4)$$

다음에, 길이 ℓ_2 인 선로를 연결하여 측정된 것을 R_{m2} 라고 하면,

$$R_{m2} = R_x R_{\ell_2} R_y \quad (5)$$

식(4)에서,

$$R_y = (R_x R_{\ell_1})^{-1} R_{m1} \quad (6)$$

식(6)를 식(5)에 대입하면,

$$R_{m2} = R_x R_{\ell_2} (R_x R_{m1})^{-1} R_{m1}$$

$$R_{m2} R_{m1}^{-1} R_x = R_x R_{\Delta \ell}$$

$$M R_x = R_x R_{\Delta \ell} \quad (7)$$

여기서, $R_{\Delta \ell} = R_{\ell_2} R_{\ell_1}^{-1}$

$$M = R_{m2} R_{m1}^{-1} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$$

식(7)을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\gamma \Delta \ell} & 0 \\ 0 & e^{+\gamma \Delta \ell} \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 행렬식을 전개하면,

$$m_{11}x_{11} + m_{12}x_{21} = x_{11} \exp(-\gamma \Delta \ell) \quad (9)$$

$$m_{21}x_{11} + m_{22}x_{21} = x_{21} \exp(-\gamma \Delta \ell) \quad (10)$$

$$m_{11}x_{12} + m_{12}x_{22} = x_{12} \exp(+\gamma \Delta \ell) \quad (11)$$

$$m_{21}x_{12} + m_{22}x_{22} = x_{22} \exp(+\gamma \Delta \ell) \quad (12)$$

식(9)와 식(10)을, 식(11)과 식(12)를 각각 $\exp(\gamma \Delta \ell)$ 로 정리하면

$$m_{21} \left(\frac{x_{11}}{x_{21}} \right)^2 + (m_{22} - m_{11}) \frac{x_{11}}{x_{21}} - m_{12} = 0$$

$$m_{21} \left(\frac{x_{12}}{x_{22}} \right)^2 + (m_{22} - m_{11}) \frac{x_{12}}{x_{22}} - m_{12} = 0$$

위 식들의 근을 a와 b라고 하면

$$a = \frac{x_{11}}{x_{21}} = e_{00} - \frac{e_{10}e_{01}}{e_{11}} \quad (13)$$

$$b = \frac{x_{12}}{x_{22}} = e_{00} \quad (14)$$

양호한 reflectometer에 대하여 $e_{10}e_{01}$ 은 거의 1이고, e_{00} 는 매우 작다. 따라서 $a \gg b$

$$e_{00} = b \quad (15)$$

$$\frac{e_{10}e_{01}}{e_{11}} = b - a \quad (16)$$

Port 2의 오차들에 대해서도 동일한 절차를 이용한다.

이들 근을 c와 d라고 하면 식(2)로부터,

$$c = \frac{y_{11}}{y_{12}} = -e_{33} + \frac{e_{23}e_{32}}{e_{22}} \quad (17)$$

$$d = \frac{y_{21}}{y_{22}} = -e_{33} \quad (18)$$

앞의 경우에서 처럼 적절한 근을 선택하는 조건은 $c \gg d$ 이다.

따라서,

$$e_{33} = -d \quad (19)$$

$$\frac{e_{23}e_{32}}{e_{22}} = c - d \quad (20)$$

길이 ℓ_1 인 마이크로스트립 선로를 단자1과 단자2에 각각 연결하여 차례로 반사계수를 측정하면, 단자1에 연결한 후 측정시 반사계수:

$$\Gamma_1 = e_{00} + \frac{e_{10}e_{01}\Gamma_R \exp(-2\gamma(\ell_1 + \Delta \ell_1))}{1 - e_{11}\Gamma_R \exp(-2\gamma(\ell_1 + \Delta \ell_1))} \quad (21)$$

단자2에 연결한 후 측정시 반사계수:

$$\Gamma_2 = e_{33} + \frac{e_{23}e_{32}\Gamma_R \exp(-2\gamma(\ell_1 + \Delta \ell_1))}{1 - e_{22}\Gamma_R \exp(-2\gamma(\ell_1 + \Delta \ell_1))} \quad (22)$$

여기서, $\Delta \ell_1$ 은 마이크로 스트립 선로 end effect에 따른 길이이다¹⁶⁾.

식(21)과 식(22)를 $\Gamma_R \exp(-2\gamma(\ell_1 + \Delta \ell_1))$ 로 다시 정리하면,

$$\Gamma_R \exp(-2\gamma(\ell_1 + \Delta \ell_1)) = \frac{1}{e_{11}} \frac{b - \Gamma_1}{a - \Gamma_1} \quad (23)$$

$$\Gamma_R \exp(-2\gamma(\ell_1 + \Delta \ell_1)) = \frac{1}{e_{22}} \frac{d + \Gamma_1}{c + \Gamma_1} \quad (24)$$

식(23)와 식(24)으로부터,

$$e_{22} \frac{b - \Gamma_1}{a - \Gamma_1} = e_{11} \frac{d + \Gamma_1}{c + \Gamma_1} \quad (25)$$

이제 길이 ℓ_1 인 마이크로스트립 선로를 두 단자 사이에 연결하여 이미 측정된 데이터 S_{11} 을 이용하면,

$$S_{11} = e_{00} + \frac{e_{10}e_{01}e_{22} \exp(-2\gamma\ell_1)}{1 - e_{11}e_{22} \exp(-2\gamma\ell_1)}$$

$$e_{11}e_{22} \exp(-2\gamma\ell_1) = \frac{b - S_{11}}{a - S_{11}}$$

$$e_{11}e_{22} = \frac{b - S_{11}}{a - S_{11}} \exp(2\gamma\ell_1) \quad (26)$$

따라서 식(25)와 식(26)를 이용하여 e_{11} 과 e_{22} 를 구할 수 있다.

$$e_{11} = \exp(\gamma\ell_1) \sqrt{\frac{b - \Gamma_1}{a - \Gamma_1} \frac{c + \Gamma_1}{d + \Gamma_1} \frac{b - S_{11}}{a - S_{11}}} \quad (27)$$

$$e_{22} = \exp(\gamma\ell_1) \sqrt{\frac{a - \Gamma_1}{b - \Gamma_1} \frac{d + \Gamma_1}{c + \Gamma_1} \frac{b - S_{11}}{a - S_{11}}} \quad (28)$$

식(27)과 식(28)에서 $\exp(\gamma\ell_1)$ 을 구하는 절차는 다음과 같다.

먼저 $\exp(\gamma\Delta\ell)$ 을 구하기 위해 식(12)를 이용하면,

$$\begin{aligned} \exp(\gamma\Delta\ell) &= m_{21}b + m_{22} \\ P = \exp(\gamma\Delta\ell) \text{ 이라 놓으면.} \\ \exp(\gamma\ell_1) &= P^{(\ell_1/\Delta\ell)} = (\exp(\gamma\Delta\ell))^{(\ell_1/\Delta\ell)} \quad (29) \end{aligned}$$

식(16)과 식(20)으로부터,

$$e_{10}e_{01} = e_{11}(b-a) \quad (30)$$

$$e_{32}e_{23} = e_{22}(c-d) \quad (31)$$

길이 ℓ_1 을 연결하여 이미 측정된 S_{21} 을 이용하면,

$$S_{21} = \frac{e_{10}e_{32} \exp(-\gamma\ell_1)}{1 - e_{11}e_{22} \exp(-2\gamma\ell_1)}$$

따라서,

$$\begin{aligned} e_{10}e_{32} &= (S_{21} - e_{11}e_{22}S_{21} \exp(-2\gamma\ell_1)) \exp(\gamma\ell_1) \\ &= S_{21} \exp(\gamma\ell_1) - \frac{e_{11}e_{22}S_{21}}{\exp(\gamma\ell_1)} \quad (32) \end{aligned}$$

오차회로망의 오차들을 특성화하였으므로, 이제 식(3)으로부터 측정하고자 하는 소자의 S-parameter를 추출할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_0 &= (R_0R_0^{-1})^{-1} R_{TOT} (R_0R_0^{-1})^{-1} \\ &= \left[\frac{1}{e_{10}} \begin{bmatrix} e_{10}e_{01} & e_{00}e_{11} & e_{00} \\ -e_{11} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\gamma\ell} & 0 \\ 0 & e^{+\gamma\ell} \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} R_{T11} & R_{T12} \\ R_{T21} & R_{T22} \end{bmatrix} \\ &= \left[\begin{bmatrix} e^{-\gamma\ell} & 0 \\ 0 & e^{+\gamma\ell} \end{bmatrix} \frac{1}{e_{32}} \begin{bmatrix} e_{32}e_{23} & e_{22}e_{33} & e_{22} \\ -e_{33} & 1 & 0 \end{bmatrix} \right]^{-1} \end{aligned}$$

따라서,

$$R_0 = \begin{bmatrix} R_{011} & R_{012} \\ R_{021} & R_{022} \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} (A1 \cdot e_{33}A2)P1 & (-e_{22}A1 \cdot A2B2)/P1 \\ (A3 \cdot e_{33}A4)P1 & (-e_{22}A3 \cdot A4B2)/P1 \end{bmatrix}$$

여기서, R_{T11} , R_{T12} , R_{T21} , R_{T22} : 측정 R parameter

(R_{TOT})

R_{111} , R_{112} , R_{21} , R_{22} : DUT R parameter

(R_0)

$$A1 = P1 R_{T11} - P1 e_{00} R_{T21}$$

$$A2 = P1 R_{T12} - P1 e_{00} R_{T22}$$

$$A3 = (e_{11} R_{T11} + R_{T21} B1) / P1$$

$$A4 = (e_{11} R_{T12} + R_{T22} B1) / P1$$

$$B1 = e_{10}e_{01} - e_{00} e_{11}$$

$$B2 = e_{32}e_{23} - e_{22} e_{33}$$

$$C = e_{10}e_{01} e_{32}e_{23} e_{11}e_{33}$$

$$P1 = \exp(\gamma\ell_1)$$

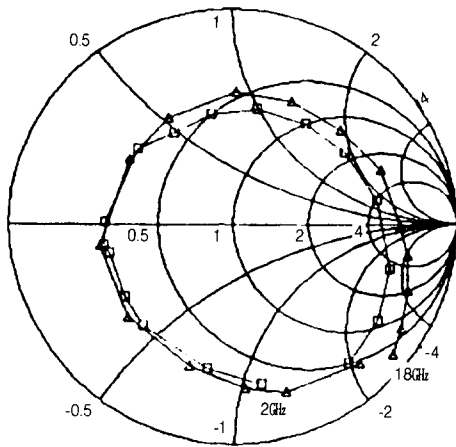
III. 실험 및 고찰

오차항 보정을 위해 길이가 서로 다른 두개의 마이크로스트립 선로를 제작하였고, 소자 특성화를 위해 디바이스를 장착시키기 위한 캐리어를 별도로 제작하였다. 보정용 마이크로스트립 선로의 길이는 $\ell_1=12.1875$ mm, $\ell_2=17.06$ mm이고, 소자는 ATF13736 GaAs MESFET를 사용하였다, 측정주파수 범위는 2 GHz에서 18 GHz이고, 바이어스는 $V_{DS}=2.5$ V, $I_{DS}=20$ mA로 하였다.

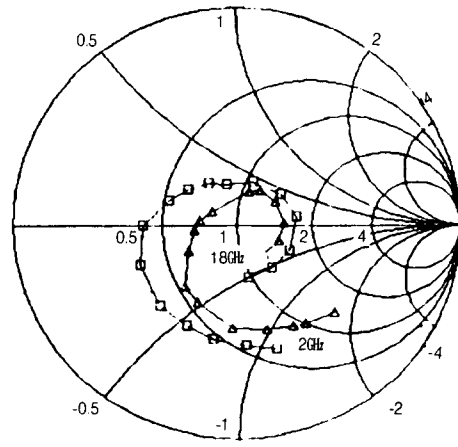
오차회로망이 포함된 전체 측정치와 보정 절차에 의해 오차항들을 제거한 후의 값, 즉 FET만의 S-parameter를 그림4에 나타내었다. 그림 4에서 오차회로망이 포함된 측정치는 가선(-) 또는 사각형(□)으로 나타내었고, 이를 보정한 FET만의 S-parameter는 굵은선(-) 또는 삼각형(△)으로 나타내었다. 본 논문에서 제안한 방법에 따라 보정된 데이터는 측정에 사용된 ATF13736의 데이터 용지에 주어져 있는 데이터와 비교해 볼 때, 상대적으로 낮은 주파수에서 크기는 거의 일치하고 단지 0.1-12도의 위상차를 보였다. 주파수가 높아짐에 따라 크기와 위상에서 다소 차이가 났다. 두 데이터 간의 최소오차와 최대오차 그리고 평균적인 오차값을 표 1에 나타내었다. 이 표에 나타난 것처럼 S_{11} , S_{22} 는 거의 일치하고, S_{22} 는 위상에서 S_{12} 는 크기에서 다소 차이를 보였다. FET 제작회사에서 제공한 데이터들이 여러개의 FET를 측정하여 그 평균치를 작성한 것이므로 반드시 정확한 데이터라고는 볼 수 없기 때문에 본 논문에서 제시한 절차로 보정한 데이터들과의 차이가 오차라고는 볼 수 없다. 측정주파

수 범위를 다소 좁히는 방법이나 또는 측정주파수 범위가 클 경우에는 보정용 마이트로스트립 선로를 제작할 때 주파수 범위를 일정 구간별로 나누어서

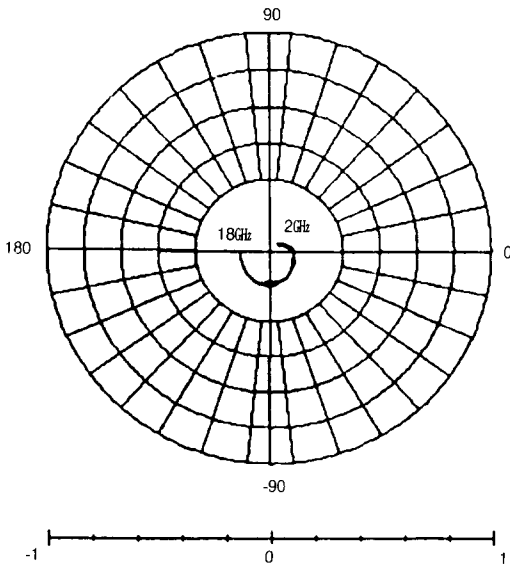
각각 그 주파수 범위에 맞도록 선로들을 제작함으로써 측정 오차를 줄일 수 있을 것이다.



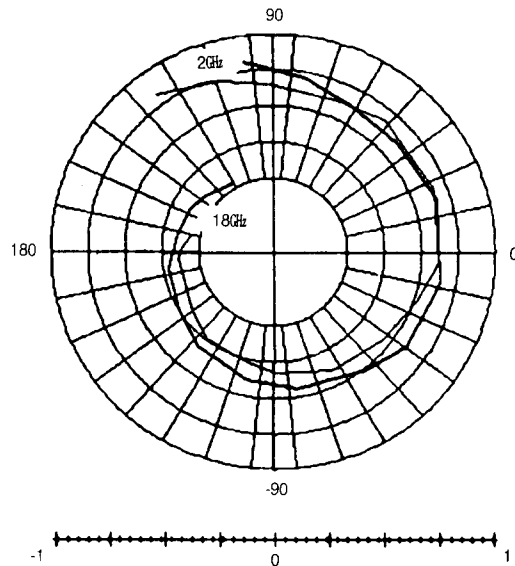
a) S_{11} □ : 보정전
△ : 보정후



b) S_{22} □ : 보정전
△ : 보정후



c) S_{12} — : 보정전
- - : 보정후



d) S_{12} — : 보정전
- - : 보정후

그림 4. 보정전과 보정후의 S-parameters

Fig.4. S-parameters for pre-calibration and post-calibration

$\ell_1=12.1875$ mm, $\ell_2=17.06$ mm

$V_{DS}=2.5$ V, $I_{DS}=20.0$ mA

표 1. 보정 데이터와 데이터 용지의 데이터와의 비교
Table 1. Comparison of the calibrated data and data sheet

	최소오차		최대오차		오차 평균	
S ₁₁	0.006	1.3°	0.214	20.0°	0.069	6.1°
S ₁₂	0.001	0.1°	0.060	12.4°	0.015	4.7°
S ₂₁	0.020	0.4°	0.560	10.8°	0.180	4.6°
S ₂₂	0.009	12.0°	0.147	106.7°	0.074	30.1°

IV. 결 론

마이크로파용 소자를 정확히 특성화하기 위해서는 오차회로망의 보정작업이 필연적으로 선행되어야 하는데, 본 논문에서는 두 개의 마이크로스트립 선로만으로 보정작업을 할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법으로 마이크로파용 FET를 특성화하였고, 이는 능동소자는 물론 기타 수동소자들도 이 절차에 의해 기존의 방법보다 간편하게 보정작업을 수행할 수 있다.

전과상수를 고려하지 않기 위해 보정용 마이크로스트립 선로 제작시 선로 길이가 정확해야 한다. 기존의 보정방법에서는 open 또는 reflect를 사용함에 따라 마이크로스트립 선로의 end effect를 고려하여야 했으나, 본 논문에서 제안한 보정방법에서는 open 또는 reflect를 사용함에 따라 마이크로스트립 선로의 end effect를 고려할 필요가 전혀 없기 때문에 손쉽게 보정용 선로를 제작할 수 있다.

参考文献

1. R. P. Meys, "Symmetric test fixture calibration", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 36, pp. 1043-1046, June, 1988.
2. R. A. Hackborn, "An automatic network analyzer system", Microwave J., vol. 11, pp. 45-52, May, 1968.
3. Robert Soares, et al., "Application of GaAs MESFETs", Artech House Inc. pp. 60-68, 1983.

4. Robert Soares, "GaAs MESFET Circuit Design", Artech House Inc. pp. 37-67, 1988.
5. Robert, W. R., et al., "Modeling and characterization of Microstrip to Coaxial transitions", IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique, vol. MTT-29 No. 8, AUG, pp. 799-805, 1981.
6. Wight, J. S., "Equivalent Circuits of microstrip impedance Discontinuities and launchers", IEEE Trans., on Microwave Theory and Technique, pp. 48-52, January, 1974.
7. Souza, J. R., et al., "S-parameter characterisation of coaxial to microstrip transition", IEE PROC., vol. 129 No. 1, Feb. pp. 37-40, 1982.
8. Gupta, K. C., "Computer aided design of microwave circuits", Artech House Inc. pp. 309-317, 1981.
9. R. lane, "De-embedding device scattering paramters", Microwave J., vol. 27, No. 8, pp. 149-152, pp. 154-156, Aug. 1984.
10. D. Brubaker and J. Eisenberg, "Measure S-parameters with the TSD technique", Microwaves & RF, pp. 97-155, Nov. 1985.
11. C. F. Engen, C. A. Hoer, "Thru-Reflect-Line: An improved technique for calibrating the dual six - port automatic network analyzer", IEE Trans. on MTT., vol. MTT-27, No. 12, pp. 987-993, 1979.
12. R. A. Soares, P. Gonzi, P. Legaud and Follot, "A unified mathematical approach to two-port calibration techniques and some applications", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., vol. 37, No. 11, pp. 1669-1673, Nov. 1989.
13. J. Mondal and T. Chen, "Propagation constant determination in microwave fixture de-embedding procedure", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., vol. 36, pp. 706-713, Apr. 1988.
14. M. A. Marry Jr., S. L. March and G. R. Simpson, "LRL calibration of vector automatic network analyzers", Microwave J.,

- pp. 387-392, May, 1987.
15. R. P. Meys, "A triple-through method for characterizing test fixtures", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech, vol. 36, No. 6, pp. 1043-1046, June, 1988.
16. James D. S., and Tse S. H., "Microstrip end effects", Electron. Lett., 8, pp. 46-47, 1972.

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구비 지원에 의한 결과임(과제번호 : ADD-90-2-12)
