

마이크로파 측정과 Six-port ANA

정낙삼  
한국표준연구소

Microwave Measurements and Six-Port ANA

Nak Sam Chung

Korea Standards Research Institute

I. 서론

마이크로파 영역에서 1-port 기기에 대하여 측정하는 것은 주로 절대값(absolute power) 과 반사계수  $\Gamma$  이다. 이때 전력은 스칼라양이기 때문에 비교적 측정의 용이하나, 벡터양인  $\Gamma$  는 그렇지 못하여 여러 가지 측정방법이 연구되어 왔었다. Slotted line 을 이용한 정제파비 측정이나, 방향성 결합기를 이용한 반사계(reflectometer)등이 그것이다. 이것이 보다 발전하여 2-port 회로망의 전송 특성과 반사 특성을 동시에 측정할 수 있게 한 것이 회로망 분석기이다. 기존의 회로망 분석기는  $\Gamma$  의 크기와 위상을 혼합기(mixer) 를 통하여 주파수 변환된 중간 주파수(대개 두번 변환한다)에서 측정하는 것이다. 이 방식은 혼합기의 비선형에 의한 오차를 피할 수 없고, 전체적인 측정 회로는 상당히 복잡하게 된다.

한편 두 개의 벡터양의 신호가 있을때, 신호 각각의 크기와 두 신호의 합 또는 차의 크기를 알면 두 신호 사이의 위상차를 알 수 있다는 것이 역현법칙(law of cosines) 으로 알려져 있다. 이것을 적용한 것이 바로 6-port 반사계이며 크기에 관한 정보만으로 위상도 얻어낼 수 있게 된다. 이러한 개념은 새로운 것은 아니나, 방대한 행렬식의 처리등이 쉽지 않아 실용화 되지 못하였다가, 최근 소형 컴퓨터의 급격한 발달 및 보급에 따라 다시 6-port ANA (Automatic Network Analyzer, 자동회로망 분석기)에 대한 연구가 진행되었고 이제는 구미의 몇몇 선진국뿐만 아니라 우리

나라에서도 개발, 활용하게 되었다. [1]

이렇게 컴퓨터를 최대한 활용한 6-port ANA 는 크기에 관한 정보만으로도 위상값을 도출해 낼 뿐 아니라 측정회로에서 연유하는 각종 불안전성을 소프트웨어를 통하여 보정할 수 있는 커다란 장점을 가지게 된다. 이제 6-port ANA 의 개념과, 그 구조, 그리고 실제 측정을 위한 시스템의 고정(calibration)에 관하여 알아보자.

II. 6-port 반사계의 원리

국초 단파 측정에서는 저주파의 전압(V)과 전류(i)의 개념보다는 그림1에 보인대로 측정 기준면(reference plane)에서 입사파와 반사파의 진폭(위상각을 포함한 복소량) a와 b를 사용하는 것이 편리하다. [2]

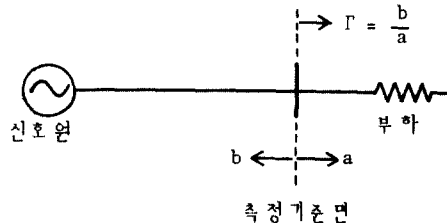


그림 1. 입사파와 반사파의 진폭 및 반사계수

이때,  $V/\sqrt{Z_0} = a + b$  (1)

$\sqrt{Z_0}I = a - b$  (2)

의 관계를 가지며  $Z_0$  는 전송선의 특성 임피던스이고,  $\Gamma (= b/a)$  는 반사계수이다.

따라서 측정 기기의 반사계수를 측정하기 위하여는 그림

2와같은 4-port 반사계를 생각할 수 있다.

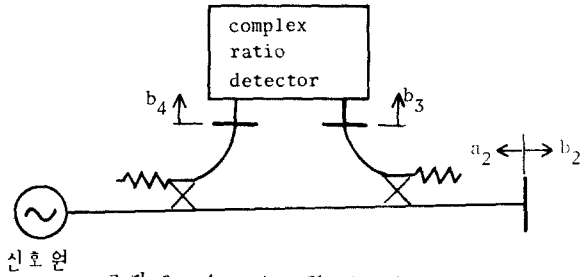


그림 2. 4-port reflectometer

그림 2에서 측정 시스템이 선형 이라면,

$$b_3 = Aa_2 + Bb_2 \quad (3)$$

$$b_4 = Ca_2 + Db_2 \quad (4)$$

이 된다. 여기서 A, B, C, D는 복소상수이다. 이때 B=C=0 가 되면  $b_3$  는  $a_2$  에,  $b_4$  는  $b_2$  에 각각 비례하는 이상적인 반사계가 되어,  $b_3/b_4$  를 측정함으로써 우리가 원하는 양  $\Gamma = \frac{a_2}{b_2}$  를 구할 수 있게된다. 이것이 종래의 하드웨어에 의존한 시도이며 위의 B=C=0 의 조건을 정밀 설계 제작된 방향성 결합기와 멀티스커브 튜너 등으로 만족시키려는 것이다. [3] 이 방법에서 측정의 정밀정확도는 바로 부품이 얼마만큼 이상적인 부품에 가깝게 만들어졌나에 제한을 받게 된다. 한편, 자동회로망 분석기에서는 위의 시스템 상수 A, B, C, D 를 알고  $b_3/b_4$  의 복소비 (complex ratio) 를 측정함으로써 식(3), (4)의 선형 방정식으로 부러  $\Gamma$  를 구하게 된다. 그러나 일반적으로 자동회로망 분석기는 고가이고 복잡한 시스템 구조를 갖는데 이는 주로  $b_3$  와  $b_4$  의 크기와 아울러 위상차이까지 동시에 측정해야 하기 때문이다. 이러한 위상 측정의 어려움을 그림 3에서와 같이 2개의 감지기 (detector) port 를 추가함으로써 해결한 것이 6-port 반사계이다. [4]

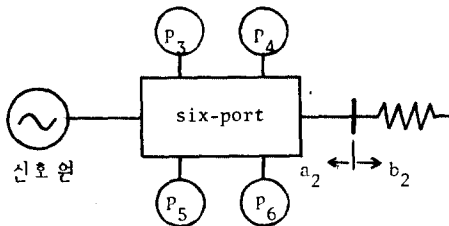


그림 3. 6-port reflectometer

그림 3에서 4 개의 측정 port 에 연결된 것은 모두 전력의 크기만을 측정하는 감지기이다.

이제 6-port 반사계에서 복소 반사계수를 구하는 원리를 알아보자. 그림 3의 port 5 와 port 6 에 대하여도 (3), (4)와 비슷한 식을 얻을 수 있고, 각 port 에서 측정되는 전력은,

$$P_3 = |Aa_2 + Bb_2|^2 \quad (5)$$

$$P_4 = |Ca_2 + Db_2|^2 \quad (6)$$

$$P_5 = |Ea_2 + Fb_2|^2 \quad (7)$$

$$P_6 = |Ga_2 + Hb_2|^2 \quad (8)$$

으로 나타낼 수 있다.

여기서 A ~ H 는 6-port 반사계와 전력측정기의 특성을 나타내는 시스템 상수이다. 이제,

$$q_3 = -\frac{B}{A}, q_4 = -\frac{D}{C}, q_5 = -\frac{F}{E}, q_6 = -\frac{H}{G}, \Gamma_L = \frac{a_2}{b_2}$$

$$P_3 = |A|^2 |b_2|^2 |\Gamma_L - q_3|^2 \quad (9)$$

$$P_4 = |C|^2 |b_2|^2 |\Gamma_L - q_4|^2 \quad (10)$$

$$P_5 = |E|^2 |b_2|^2 |\Gamma_L - q_5|^2 \quad (11)$$

$$P_6 = |G|^2 |b_2|^2 |\Gamma_L - q_6|^2$$

이 되며,  $q_3, q_4, q_5$  및  $q_6$  는 6-port 시스템 상수에 따라 결정된다. 이제  $\Gamma_g \equiv -C/D$  로 정의하면 식

$$P_4 = |D|^2 |b_2|^2 |1 - \Gamma_L \Gamma_g|^2 \quad (13)$$

이 된다.

4-port 반사계의 경우와 마찬가지로 6-port 의 경우도  $\Gamma_g = -C/D \ll 1$  이 되도록 설계할 수 있고 실제의 경우 그렇게 한다.

이제  $\Gamma_g = 0$  이라 가정하고  $P_3, P_5, P_6$  를  $P_4$  로 각각 나누어 주면

$$P_3' \equiv P_3/P_4 = |A/D|^2 |\Gamma_L - q_3|^2 \quad (14)$$

$$P_5' \equiv P_5/P_4 = |E/D|^2 |\Gamma_L - q_5|^2 \quad (15)$$

$$P_6' \equiv P_6/P_4 = |G/D|^2 |\Gamma_L - q_6|^2 \quad (16)$$

을 얻을 수 있다. 따라서  $\Gamma_L$  은 전력비  $P_3', P_5', P_6'$  와 6-port 상수로 결정되는 3개의 원의 교점으로 부러 구할 수 있게 되었다. 이것이 그림 4에 나타나 있다. 그러나,  $\Gamma_g = 0$  이라는 가정을 하지 않고 일반적인 해를 얻으려면 다음과 같이 2단계로 구하는 것이 간편하다. [5]

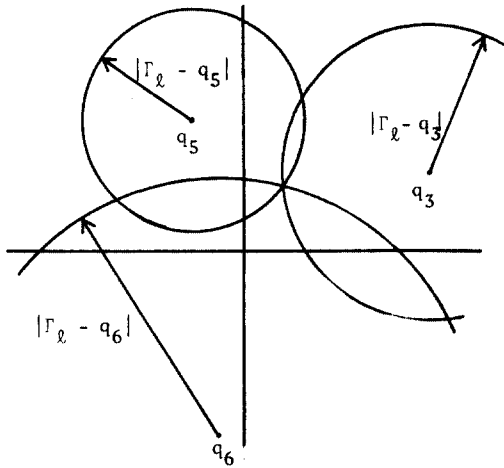


그림 4. q-평면에서  $\Gamma_L$  의 결정

제 1단계 :  $w \equiv b_3/b_4$  를 정의하여  $w$  를  $p_3', p_5', p_6'$  의 함수로 표시하여,  
 $w = b_3/b_4 = f(p_3', p_5', p_6')$  를 구하고,

제 2단계 :  $\Gamma_L$  을  $w$  의 함수로,  
 $\Gamma_L = g(w)$  를 구한다.

그 이유는 첫번째 단계의  $w = b_3/b_4$  가 구해지면 두 번째 단계는 이제까지 잘 알려진 4-port 반사계의 원리를 그대로 이용할 수 있기 때문이다.

첫번째 단계로 식(3)과(4)에서  $a_2, b_2$  에 관하여 풀고, 이것을 식(5), (8)에 대입하면,

$$|w|^2 = p_3' \quad (19)$$

$$|w - w_1|^2 = \alpha p_5' \quad (20)$$

$$|w - w_2|^2 = \beta p_6' \quad (21)$$

을 얻을 수 있다. 여기서  $w_1, w_2, \alpha, \beta$  는 다음과 같다.

$$w_1 \equiv \frac{A}{D} \frac{q_5 - q_3}{1 - q_5 \Gamma_g} \quad (22)$$

$$w_2 \equiv \frac{A}{D} \frac{q_6 - q_3}{1 - q_6 \Gamma_g} \quad (23)$$

$$\alpha \equiv \left| \frac{A}{E} \right|^2 \left| \frac{1 - q_3 \Gamma_g}{1 - q_5 \Gamma_g} \right|^2 \quad (24)$$

$$\beta \equiv \left| \frac{A}{G} \right|^2 \left| \frac{1 - q_3 \Gamma_g}{1 - q_6 \Gamma_g} \right|^2 \quad (25)$$

이때  $w_1$ 의 위상(argument) 은 A/D 의 위상에 따라 달라지는데, A/D 의 위상은 port 3 과 port 4 의 단말(terminal plane) 의 위치에 따라 달라지게 된다.

그러나 이 위치는 전력 측정기의 물리적인 위치와 반드시 일치하지 않아도 좋으므로 A/D 의 위상, 즉,  $w_1$  의 위상은 임의로 정하여도 일반성을 잃지 않는다.

$w_1$  을 양의 실수 ( $\arg(w_1) = 0$ ) 로 정하고  $w_2$  가 임의의 복소수인 경우에  $w$  의 값을 구하는 세계의 원이 그림 5 에 나타나 있다.

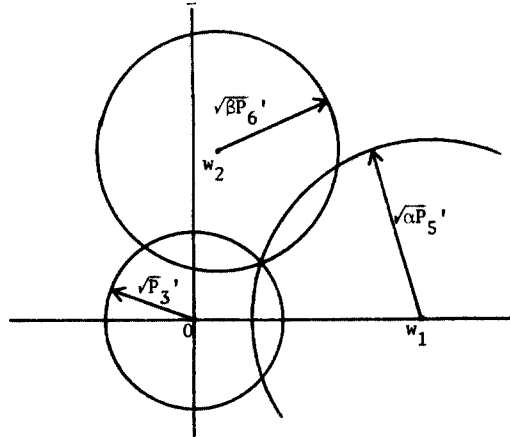


그림 5. w-평면에서  $\Gamma_L$  의 결정

이제  $w$  를 이용하여 식(3) 과 (4)에서  $\Gamma_L$  을 구하면

$$\Gamma_L = \frac{w - (B/D)}{-w(C/D) + (A/D)} \quad (26)$$

가 된다.

이제까지의 결과는,  $\Gamma_L$  을 구하기 위한 필요상수가 A ~ H 의 8개의 복소상수 (16개의 실수상수)에서  $|A|, |C|, |E|, |G|, q_3, q_4, q_5, q_6$  (12개의 실수상수)로 줄어 들었고, 이것은 식(19)~(26)의 경우에서는 실수상수  $\alpha, \beta$  와 복소상수  $w_1, w_2, A/D, B/D, C/D$  의 형태로 나타나 있다.

### III. 6-port 반사계의 구조

앞에서 일반적인 6-port 반사계가 어떻게 반사계 수를 측정할 수 있는가 그 원리를 알아보았는데, 여기서는 실제 이들을 어떻게 구성할 수 있는가를 살펴보자.

6-port 반사계의 회로 설계에서 가장 중요한 것은 6-port 시스템 상수 중  $\alpha$  값을 어떻게 배치 하는가이다.

이상적인 설계 기준은 식(9)~(12)의  $\alpha$  값들이  $|q_3| = |q_5| = |q_6| = |\alpha|, \Gamma_g = 0$  이며  $q_3, q_5, q_6$  가 서로  $\pm 120^\circ$  의 위상차이를 가지는 것이다.  $|\alpha|$  의 최적값은



#### IV. Six-port ANA 와 그 고정

지금까지 우리는 6-port reflectometer 를 사용하여 어떻게 반사계수를 측정하나 살펴보았는데, 시스템상수 A~H 는 알고 있는 것으로 간주했다. 실제로, 측정을 통해서 A~H 를 결정해야 하고, 이 결정하는 과정을 고정이라고 한다.

고정 방법을 알아 보기 위해 우선 2-port 기기의 측정 문제를 살펴보자. 2-port 기기의 특성은 산란계수로 기술할 수 있으며 이 산란계수를 구하는 수단이 회로망 분석기 이다.

이를 위해 앞에서 기술한 바와같은 6-port 반사계 두 대를 이용하여 dual 6-port ANA 를 구성할 수 있다. [11]

그림 9와 같은 임의의 2-port 기기는

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (31)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (32)$$

로 나타낼 수 있다.

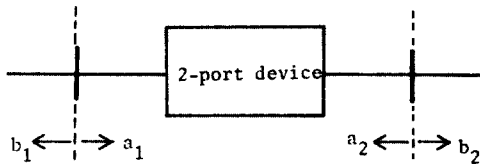


그림 9. 2-port 기기의 특성 측정

식 (31) 과 (32) 에서  $\rho_i \equiv b_i/a_i$  ( $i = 1, 2$ ),

$\Delta \equiv S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22}$  로 정의하면

$$\rho_1 S_{22} + \rho_2 S_{11} - \Delta = \rho_1 \rho_2 \quad (33)$$

을 얻는다.

식 (33) 에서 보면  $\rho_1, \rho_2$  는 6-port 반사계 #1, #2 가 측정할 수 있는 양이다. 이때 두 개의 6-port 에 입사하는 두 신호의 상대적 조건을 바꾸면 다른 조건하에서  $\rho_1, \rho_2$  의 측정치를 얻게 된다. 이것을 식 (33) 에 대입하여 연립 방정식을 풀면  $S_{11}, S_{22}, \Delta$  을 구해낼 수 있고, 곧  $S_{12}S_{21}$  을 알게 된다.

만일 피측정 2-port 기기가 대칭성을 가진 것이라면  $S_{12} = S_{21}$  이 되고  $S_{12}$  의 부호 즉 위상의  $180^\circ$  차이 (ambiguity) 를 제외하면 2-port 의 산란계수를 완전히 측정해 내는 것이 된다. 예를들면 감쇠기의 경우

$S_{11}, S_{22}$  가 양쪽 port 의 VSWR 을,  $S_{12} = S_{21}$  의 크기가 바로 감쇠량 (Insertion loss) 을 나타내게 된다.

이제 남은 과제는  $\Pi$  절에서 알려져 있다고 가정한 6-port 반사계의 시스템 상수 12 개를 결정하는 것, 즉, 6-port 시스템의 고정 (calibration) 이다.

극초단파 영역에서는 저주파의 경우와는 달리 거의 매 측정시 시스템을 고정하여야 한다. 종래의 4-port 반사계의 고정은 1-port 기기의 경우 sliding short 와 sliding termination 및 한개의 임피던스 표준으로 고정할 수 있고, 2-port 기기의 경우 "thru-short-delay" (TSD) 방법으로 고정할 수 있다. [12, 13] 이 TSD 방법은 실제의 (불완전한) 반사계가 이상적 (완전한) 반사계와 2-port "error box" 가 직렬로 연결된 것으로 보아 이 "error box" 의 산란계수를 결정하여 시스템을 고정한다. 6-port 반사계 및 6-port ANA 의 고정도 종래의 4-port 반사계의 고정방법들을 그대로 응용하여 쓰기도 하지만, 6-port ANA 의 경우 TSD 방법과 유사하면서도 개선된 "thru-reflect-line" (TRL) 방법이 개발되었다. [14]

이 방법은 먼저 6-port 을 4-port 으로 줄이고, (앞 절에서  $w$  를 구하는 과정까지가 이에 해당함) 다음 그림 10에 보인대로 각 6-port 는 이상적인 4-port 반사계와 "error box" 가 직렬 연결된 것으로 간주 한다.

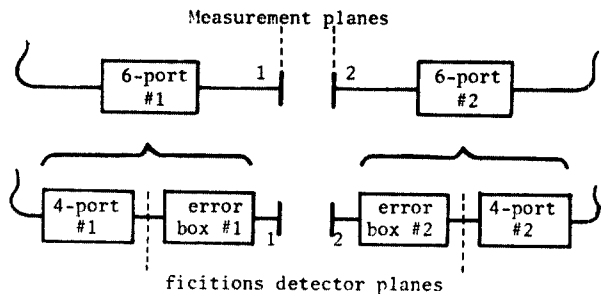


그림 10. Reduction of 6-port to an ideal 4-port in cascade with an error box

그림 10의 가상면에서  $w$  가 측정된다고 생각하고, 두 측정면 사이에서 2-port 기기가 측정된다고 생각한다. 이때 측정면 사이에 TRL 을 적용시킨다. 즉, 1) 두

측정면을 맞물리고 측정하며(T, thru), 2) 두 측정면 사이에 머지의 높은 반사계수를 가진 단말을(R, reflect : short 또는 open), 그리고 3) 임의의 결의 air line 으로 연결하여(L, line) 측정한다.

위의 1) 과 3)의 경우 각 6-port 에 입사하는 신호의 조건을 다르게 하여(예로서 상대적인 위상차가  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  되게 하여) 여러가지 다른 측정조건에서 측정하여 이들에서 얻어지는 식들을 연립시켜 "error box" 의 산란계수를 구하면 모든 과제가 해결된 셈이다.

#### V. 결론 및 논의

지금까지 살펴본대로 6-port ANA 는 소형 컴퓨터의 급격한 발달에 힘입어 개발된 것으로 마이크로파 측정에 커다란 전환점을 가져오게 한 것이라고 볼 수 있다. 그 좋은 예로 미국 NBS 의 마이크로파 표준 및 그 보급게기가 앞으로 수년내에 모두 6-port 시스템으로 바뀌게 된다는 것과 또한 미국 육·해·공군의 1차 표준기관이 모두 이 시스템을 도입하여 표준 장비로 설치한 것을 들 수 있겠다. 이러한 6-port가 현재 가지고 있는 특징들을 정리해 보면 첫째, 주파수 변환이 필요 없어 한개의 신호원만 필요하고, 둘째, 크기만의 측정이 필요하므로 비교적 간단하다.

셋째, 자체고정의 근본 원리를 가지고 있으며 현재로서 가장 정확한 마이크로파 임피던스의 표준이 되는 air-line 을 표준으로 사용할 수 있다. 넷째, built-in redundancy 를 가지고 있어 신뢰도가 높고 고정을 자주 하지 않아도 된다는 장점을 가지고 있다.

현재 감지기로 쓰이고 있는 써머스터 마운트가 많은 전력을 요구하며 측정범위가 다소 제한되어 있다는 단점이 있어서 다이오드 감지기의 개발 및 활용등이 중요한 연구 대상으로 되어있다.

또한 지금까지의 측정 대상이 주로 대칭성을 가진 수동 소자였으나, 비대칭성의 수동소자 및 능동 소자까지의 측정에 이용하기 위한 연구등이 중요한 과제가 되고 있다.

최근 밀리미터파의 이용이 무척 활발해지고 있는데 아직 이 영역에서 적당한 측정게기가 별로 없으므로 6-port ANA 의 역할이 더한층 중요하게 되리라 믿어지고 있다.

#### \* 참고 문헌 \*

- (1) N. S. Chung, J. H. Kim and J. Shin, "A dual six-port automatic network analyzer and its Performance," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-32, pp. 1683-1686, Dec. 1984.
- (2) R. E. Collin, Foundations for Microwave Engineering, Chap. 4, McGraw-Hill, 1966.
- (3) G. F. Engen and R. W. Beatty, "Microwave reflectometer techniques," IRE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-7, pp. 351-355, Jul. 1959.
- (4) G. F. Engen, "The six-port reflectometer : An alternative network analyzer," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-25, pp. 1075-1080, Dec. 1977.
- (5) G. F. Engen, "Calibrating the six-port reflectometer by means of sliding terminations," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-26, pp. 951-957, Dec. 1978.
- (6) C. A. Hoer, "Using six-port and eight-port junctions to measure active and passive circuit parameters," NBS Tech. Note 673, Sep. 1975.
- (7) G. F. Engen, "An improved circuit for implementing the six-port technique of microwave measurements," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. MTT-25, pp. 1080-1083, Dec. 1977.
- (8) R. H. Collier, "On the use of a micro-strip three-line system as a 6-port reflectometer," to be published.
- (9) D. Parlidis, H. L. Hartnagel, "The design and performance of three-line microstrip couplers," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-24, Oct. 1976.
- (10) V. K. Tripathi, "On the analysis of symmetrical three-line microstrip circuits," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-25, pp. 726-734, Sep. 1977.

- (11) C. A. Hoer, "A network analyzer incorporating two six-port reflectometers," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-25, pp. 1070-1074, Dec. 1977.
- (12) N. R. Franzen and R. A. Speciale, "A new procedure for system calibration and error removal in automated S-parameter measurements," in Proc. 5th European Microwave Conf. (Hamburg, Germany, Sep. 1-4, 1975), Sevenoaks, Kent; England : Microwave Exhibitions and Publishers, pp. 69-73.
- (13) N. R. Franzen and R. A. Speciale, "Accurate scattering parameter measurements on non-connectable microwave networks," in Proc. 6th European Microwave Conf. (Rome, Italy, Sep. 14-17, 1976), Sevenoaks, Kent, England: Microwave Exhibitions and Publishers, pp. 210-214.
- (14) G. F. Engen, "An improved technique for calibrating the dual 6-port ANA," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-27, pp. 987-993.