

# 결합 선로를 이용한 평판 구조의 Marchand 발룬의 합성

## Synthesis of Marchand Balun Using Planar Coupled-Line

이 종 환 · 염 경 환

Jong-Hwan Lee · Kyung-Whan Yeom

### 요 약

평판형 결합 선로를 이용한 Marchand 발룬의 합성 기법을 제시하였다. 이러한 형태의 발룬이 갖추어야 할 설계 조건에 대해서 살펴보고, 설계 조건에 부합하는 발룬의 합성을 전송선 등가회로를 통해 간편하게 모델링 할 수 있음을 보였다. 합성된 발룬은 equi-ripple 대역 통과 특성을 나타내고, 일반적인 평판 구조에서 구현하기 어려운 평형 선로 없이도 크기가 같고 위상이 반대인 평형 신호를 얻을 수 있다. 결합 선로를 이용한 Marchand 발룬의 구현에 많이 사용되는 다중 결합 선로의 물리적 구조와 발룬의 합성에 필요한 요소값들 사이의 관계를 해석하는 방법도 소개하였다. 이상의 방법들을 이용하면 평판 구조의 다중 결합 선로를 갖는 Marchand 발룬의 체계적인 설계가 가능하다.

### Abstract

The synthesis procedure of Marchand balun using planar coupled-line is presented. The design limitations of this type of balun have been described before its synthesis procedure. The balun has equi-ripple passband responses and balanced output without fourth balanced transmission line which is difficult to implement with conventional planar topology. As an example, 2:1 Marchand balun is designed and its momentum simulation result show good verification for this methodology.

Key words : Third-Order Marchand Balun, Planar Coupled-Line, Synthesis

### I. 서 론

발룬은 불평형 선로와 평형 선로를 연결해 주는 회로 소자로서, 불평형 입력과 평형 출력간의 임피던스 변환도 가능하다. 평형 선로에는 크기가 같고 위상이 반대인 평형 신호가 전달되는데, 이러한 평형 신호는 주파수 혼합기, 증폭기, 위상 천이기, 그리고 안테나 급전부 등에서 폭 넓게 활용된다.

1944년 Marchand 발룬이 소개된 이래<sup>[1]</sup>, 그 설계와 해석에 대한 많은 연구가 뒤를 이었으며<sup>[2]~[7]</sup>, 오늘날 가장 각광 받는 광대역 초고주파 발룬의 한 형태가 되었다. 특히, 결합 선로를 이용한 평판 구조의

Marchand 발룬은 MIC(Microwave Integrated Circuits)와 MMIC(Monolithic MIC)에 매우 뛰어난 유연성과 호환성을 갖는데, 이들은 상대적으로 크기가 작고 표면 실장에 유리하여 대량 생산에 적합하다.

결합 선로를 이용한 평판 구조의 Marchand 발룬이 원하는 주파수 대역을 갖기 위해서는 적절한 결합 파라미터의 결정이 중요하다. 하지만, 그간의 논문들은 새로운 구조의 제안과 그 이용에 중점을 두어 왔었다<sup>[8]</sup>. 이에 Goldsmith는 결합 선로를 이용한 평판 구조의 4차 Marchand 발룬을 구현하기 위한 합성 방법을 처음으로 소개하였으나<sup>[9]</sup>, 이 방법은 통상적인 평판 구조에서 구현하기 어려운 평형 선로를

「본 연구는 동국대학교 ERC 센터인 밀리미터파 신기술 연구센터의 지원에 의하여 수행되었음.」

「본 연구는 한국과학기술원 전파탐지 특화연구 센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20041105-09S

· 수정완료일자 : 2004년 12월 16일

필요로 할 뿐만 아니라, 유도된 수식들은 평형 선로가 없는 3차 Marchand 발룬<sup>[10],[11]</sup>의 합성에는 적용할 수 없다.

본 논문에서는 결합 선로를 이용한 Marchand 발룬의 체계적인 합성 기법을 제시하였다. 결합 선로에 대한 네트워크 모델이 적용된 발룬의 등가 회로를 구하고, 평형 신호를 얻기 위한 조건을 적용하여  $\lambda_g/4$  전송선 등가 회로로 단순화한다. 전송선 등가 회로가 equi-ripple한 대역 통과 특성을 갖도록 각 전송 선로의 특성 임피던스 값들을 결정하여 네트워크 모델이 적용된 등가 회로의 분포 소자 값들을 구한다. 평판형 다중 결합 선로가 이와 같이 결정된 분포 소자 값들을 갖도록 해석함으로써 발룬의 합성이 가능하다.

### II. 설계 조건

결합 선로를 이용한 평판 구조의 Marchand 발룬은 그림 1과 같이 대표되어 나타내질 수 있다. 종단이 open된 반 파장 선로에 불평형 신호가 인가되고, 입력단과 반 파장 선로 종단에서 한쪽 끝이 각각 접지된 두 개의  $\lambda_g/4$  결합 선로의 다른 쪽 끝으로부터 크기가 같고 위상이 서로 반대인 평형 신호를 얻을 수 있다.

그림 1의 결합 선로들은 커패시턴스 행렬 변환을 사용하여 결합 선로에 대한 단위 분포 소자의 특성 임피던스  $Z_1$ ,  $Z_2$ 와 임피던스 변환비  $n$ 을 갖는 4단자 네트워크 모델로 표현될 수 있다<sup>[12]</sup>. 이 네트워크 모델을 이용하여 그림 1의 발룬에 대한 등가 회로를 구성하고<sup>[9]</sup>, 회로 종단의 open과 short에 따라 Richard 변환을 적용하여 그림 2와 같이 단순화시킬 수 있다. 여기서 첨자  $a, b$ 는 각각 좌, 우 결합 선로를 구분하기 위해 사용되었고,  $N$ 은  $n_b/n_a$ 이다.

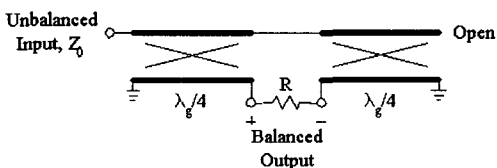


그림 1.  $\lambda_g/4$  결합 선로를 이용한 Marchand 발룬  
Fig. 1. Representation of Marchand balun using quarter-wave coupled line.

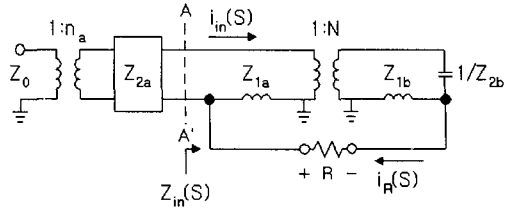


그림 2. 네트워크 모델과 Richard 변환에 의한 Marchand 발룬의 등가회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of Marchand balun using network model and Richard's transform.

그림 2의 회로에서 저항  $R$ 의 양단에 걸린 전압을 각각  $v^+(S)$ ,  $v^-(S)$ 라 하면 이들의 비는

$$\frac{v^+(S)}{v^-(S)} = \frac{-Z_{1a} \left( \left(1 - \frac{1}{N}\right) S Z_{1a} + R \right)}{Z_{1b} \left( \left(\frac{1}{N} - 1\right) S Z_{1a} - \frac{R}{N} \right)} \quad (1)$$

이며, 이때  $S = j \tan \left( \frac{\pi}{2} \frac{\omega}{\omega_0} \right)$  이다.

그림 3은  $Z_{1a}/Z_{1b}$  와  $N$ 에 따라 저항  $R$ 의 양단에 나타나는 신호의 비에 대한 크기와 위상을 그린 것인데,  $Z_{1a} = Z_{1b}$  이고  $N = 1$  ( $n_a = n_b = n$ ) 이어야만 저항  $R$ 의 양단에서 크기가 같고 위상이 반대인 평형 신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 다시 말해, 결합 선로를 이용한 평판 구조의 Marchand 발룬은 두 결합 선로의 구조가 대칭적으로 같아야 함을 의미한다.

### III. 발룬의 합성

결합 선로를 이용한 평판 구조의 Marchand 발룬의 합성은 회로의 입력 반사 계수가 원하는 특성을 갖도록 분포 소자 값들을 결정하는 것이다. 앞서 찾은 설계 조건을 적용하여 그림 2의 회로를 그림 4와 같이 전송선 등가 회로로 표현할 수 있다. 이때 각 전송 선로는 무손실이고 그 길이는  $\lambda_g/4$ 이다.

그림 4의 회로는 입력 반사 계수가 전기가  $\theta = \pi/2$  에서 하나의 null을 갖거나,  $\theta = \pi/2$  와 0과  $\pi/2$  사이 임의의 각  $\theta_0$ , 그리고  $\pi - \theta_0$  세 지점에서 null을 가지며 통과 대역에서 equi-ripple한 특성을 갖도록 소자 값들을 결정할 수 있다. 전자의 경우는 이미 다른 문헌들을 통해 정성적으로 소개된 바 있으므로, 본 논문에서는 후자의 경우에 대해 발룬을 합성

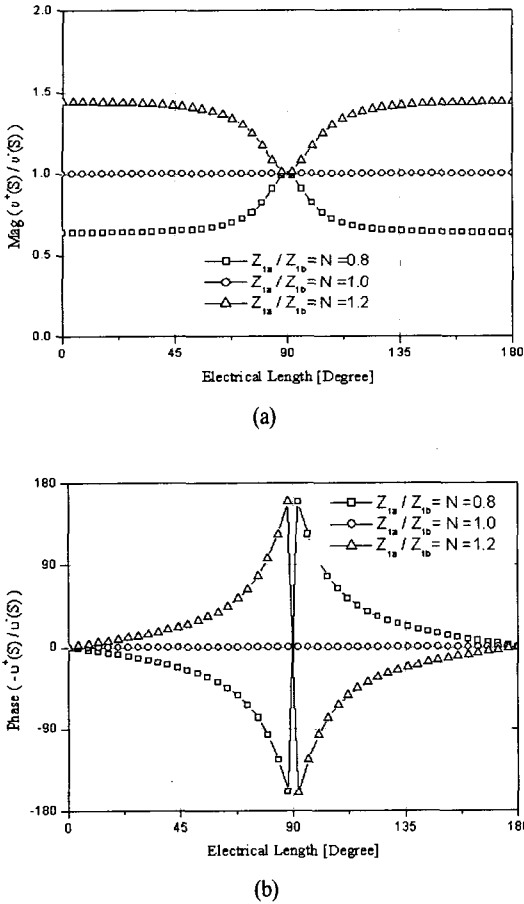


그림 3. (a) 부하 저항 R의 양단에 나타나는 신호의 비에 대한 크기, (b) 위상  
Fig. 3. (a) Amplitude ratio, (b) Phase difference at each side of load resistance R.

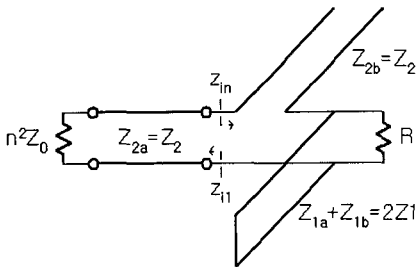


그림 4. Marchand 발룬의 전송선 등가회로  
Fig. 4. Transmission line equivalent circuit of Marchand balun.

한다.

발룬의 설계 사양인 통과 대역을 정하는 하한 주파수와 상한 주파수를 각각  $f_l$  과  $f_u$  라 하면 이들의

비  $B=f_u/f_l$ 와  $\theta_0$ 의 관계는 그림 5와 같이 찾을 수 있다<sup>[13]</sup>. 그림 4 회로에서 해석의 편의를 위해 값을  $n^2 Z_0$ 에 대해 정규화하고, source와 load 쪽으로 들여다본 임피던스  $z_{1l}=r_{1l}+jx_{1l}$ ,  $z_{in}=r_{in}+jx_{in}$ 을 구한다. 이들 임피던스들은 회로의 입력 반사 계수가  $\theta=\pi/2$ 와  $\theta_0$ 에서 null을 가지므로 복소 정합 조건에 따라

$$\begin{aligned} \text{i) } r_{1l} &= r_{in} \mid_{\theta=\pi/2} \\ z_2 &= \sqrt{r} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ii) } r_{1l} &= r_{in} \mid_{\theta=\theta_0} \\ z_1 &= \frac{r}{2\sqrt{r-1} \sin \theta_0} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{iii) } x_{1l} &= -x_{in} \mid_{\theta=\theta_0} \\ z_2 \tan \theta_0 &= \frac{z_2^2 - 1}{z_2^2 + \tan^2 \theta_0} \\ &= -\frac{r^2 2z_1 \tan \theta_0}{r^2 + 4z_1^2 \tan^2 \theta_0} + z_2 \cot \theta_0 \end{aligned} \quad (4)$$

을 만족하는  $r$ 을  $\theta_0$ 의 관계로 그림 6과 같이 찾을 수 있다.

따라서, 설계하고자 하는 발룬의 대역폭이 주어지면 정규화된 부하 저항  $r$ 을 정하고 식 (2), (3)을 통해  $z_1$ 과  $z_2$ 를 구한다. 여기에  $n=\sqrt{1+z_2/z_1}$ 을 써서 비정규화 하면 발룬의 합성에 필요한 분포 소자 값들을 모두 결정할 수 있다.

#### IV. 설계 예

대역폭이 2:1인 발룬을 설계할 경우  $\theta=60\sim 120^\circ$ 의 통과 대역에서 equi-ripple하고,  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta_0=63.7^\circ$ , 그리고  $\pi-\theta_0=116.3^\circ$ 에서 null을 갖는다. 그림 6의 대역폭과  $n^2 Z_0$ 에 정규화된 부하저항의 관계에 의해  $r=1.452$ 의 값을 가지며, 식 (2), (3)에 따라  $z_2=1.205$ ,  $z_1=1.205$ 이고,  $n=\sqrt{2}$ 이다. 이렇게 구해진 분포소자의 임피던스 값들은 일반적으로 사용되는 결합 선로의 임피던스 파라미터인 even/odd 임피던스 값들과 달리 직관을 주지 못한다. 따라서 식 (5)를 이용하여 값들을 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned} z_{oe} &= \frac{z_1}{1-k} \\ z_{oo} &= \frac{z_1}{1+k} \end{aligned} \quad (5)$$

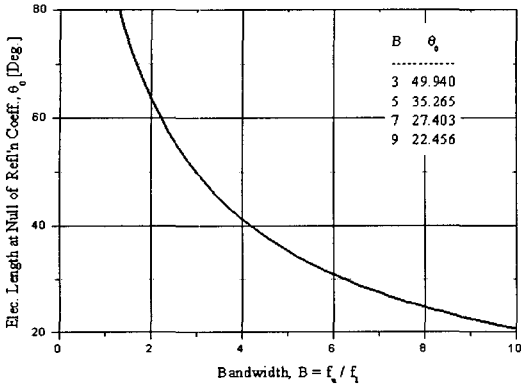


그림 5. 대역폭과  $\theta_0$ 의 관계  
Fig. 5.  $\theta_0$  versus bandwidth.

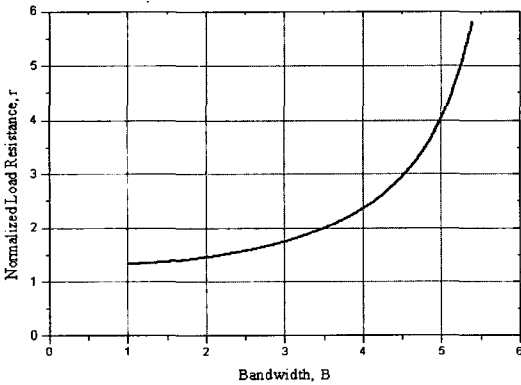


그림 6. 대역폭과 정규화된 부하저항  $r$ 과의 관계  
Fig. 6. Relationship between bandwidth and normalized load resistance.

여기서  $k=1/n$  이다.

따라서  $Z_0=50 \Omega$  에 대해 그림 4 회로의 단위 분포 소자의 임피던스 값을 찾으면  $Z_2=120.5 \Omega$ ,  $Z_1=120.5 \Omega$ , 그리고  $R=145.2 \Omega$  이다. 그리고 그림 7 과 같이 평판형 다중 결합 선로를 이용하여 발룬을 구성할 경우 필요한 even/odd 임피던스 값은 각각

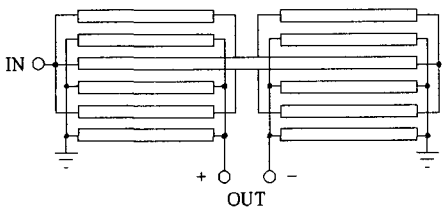


그림 7. 다중 결합 선로를 이용한 Marchand 발룬  
Fig. 7. Marchand balun using multi-coupled line.

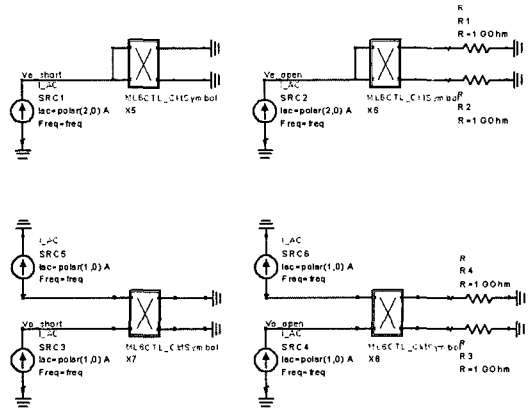


그림 8. 다중 결합 선로의 even/odd 임피던스 계산  
Fig. 8. Calculation of even/odd impedance for multi-coupled line.

$Z_{oe}=205.8 \Omega$  과  $Z_{oo}=35.2 \Omega$  이다.

하지만, 그림 7의 발룬에 사용된 다중 결합 선로의 물리적 구조와 even/odd 임피던스와의 관계에 대해 직접적이고 단순한 해석이 제공되지 않는 어려움이 있다. 따라서 그림 8과 같이 결합 선로의 종단을 open, short하고 각각에 even/odd mode를 인가하여 소프트웨어 적으로 계산하여 원하는 임피던스 값들을 얻을 수 있는 결합 선로의 물리적 구조, 즉 폭과 간격을 찾을 수 있다.

앞서 계산한 even/odd 임피던스 값을 갖도록 6중 결합 선로의 구조를 찾으면 그 폭은 0.04 mm, 간격은 0.22 mm, 그리고 1 GHz 중심 주파수에 대한 4반파장의 길이는 47.4 mm이다. 이와 같은 결합 선로로 구성된 발룬을 Agilent ADS의 모멘텀 시뮬레이션으로 확인하면 그림 9와 같다. 그림에서 파선은 계산

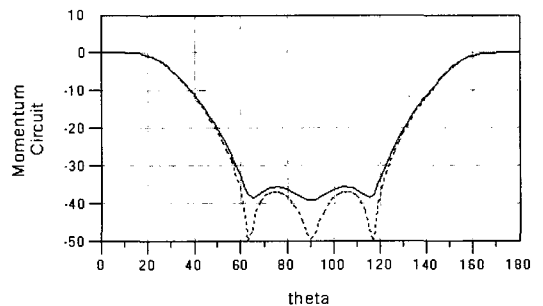


그림 9. 발룬 시뮬레이션 결과  
Fig. 9. Simulation result of the balun.

된 even/odd 임피던스 값과 부하 저항 값들을 이상적인 결합 선로 모델로 구성된 회로에 대입하여 얻은 발룬의 대역 통과 특성이고, 실선은 앞서 구한 6중 결합 선로에 대한 모넨텀 시뮬레이션 결과로서 두 값이 거의 일치하므로 제안된 발룬의 합성 방법에 대한 타당성을 검증할 수 있다.

## V. 결 론

결합 선로를 이용한 평판 구조의 Marchand 발룬의 체계적인 합성 기법을 제시하였다. 결합 선로에 대한 네트워크 모델이 적용된 발룬의 등가회로에 평형 신호를 얻기 위한 조건을 적용하여  $\lambda_g/4$  전송선 등가 회로로 단순화한다. 전송선 등가 회로가 equi-ripple한 대역 통과 특성을 갖도록 각 전송 선로의 특성 임피던스 값들을 결정하여 네트워크 모델이 적용된 등가 회로의 분포 소자 값들을 구함으로써 원하는 사양의 발룬을 합성할 수 있다. 광대역 발룬의 구현에 사용되는 다중 결합 선로의 물리적 구조와 결합 파라미터간의 관계를 소프트웨어적으로 찾을 수 있는 방법을 제시하였다. 이상의 방법을 이용하면 2:1의 대역폭을 갖는 다중 결합 선로를 이용한 발룬의 설계에서 보듯 최근 각광받는 MIC와 MMIC에 대해 뛰어난 유연성과 호환성을 갖는 Marchand 발룬의 설계가 가능하다.

## 참 고 문 헌

[1] N. Marchand, "Transmission line conversion transformers", *Electronics*, vol. 17, pp. 142-145, Dec. 1944.  
 [2] W. K. Roberts, "A new wide-band balun", *Proc. IRE*, vol. 45, pp. 1682-1631, Dec. 1957.  
 [3] J. W. McLaughlin, D. A. Dunn, and R. W. Grow, "A wide-band balun", *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, pp. 314-316, Jul. 1958.  
 [4] G. Oltman, "The compensated balun", *IEEE Trans.*

*Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-14, pp. 112-119, Mar. 1966.

- [5] G. J. Laughlin, "A new impedance-matched wide band balun and magic tee", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-24, pp. 135-141, Mar. 1976.  
 [6] J. Cloete, "Exact design of the Marchand balun", *Proc. 9th Eur. Microwave Conf.*, pp. 480-484, Sep. 1979.  
 [7] J. Cloete, "Graph of circuit elements for the Marchand balun", *Microwave J.*, pp. 125-128, May 1981.  
 [8] A. M. Pavio, A. Kikel, "A monolithic or hybrid broadband compensated balun", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 483-486, 1990.  
 [9] C. L. Goldsmith, A. Kikel, and H. L. Wilkens, "Synthesis of Marchand baluns using multilayer microstrip structures", *International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 179-188, 1992.  
 [10] S. A. Mass, K. W. Chang, "A broadband, planar, doubly balanced monolithic Ka-band diode mixer", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.*, vol. 41, no. 11, pp. 2330-2335, Dec. 1993.  
 [11] Y. I. Ryu, K. W. Kobayashi, and A. K. Oki, "A monolithic broadband doubly balanced EHF HBT star mixer with novel microstrip baluns", *Microwave and Millimeter Wave Monolithic Circuits Symposium Digest*, pp. 155-158, 1995.  
 [12] J. A. G. Malherbe, *Microwave Transmission Line Filters*, Artech House, Dedham, MA, 1979.  
 [13] V. Trifunovic, B. Jakanovic, "Review of printed Marchand and double-Y baluns: characteristics and applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-42, pp. 1454-1462, Aug. 1994.

### 이 중 환



1998년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
2000년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 박사과정

[주 관심분야] 초고주파 능동회로 및 시스템, MMIC 설계

### 염 경 환



1976년~1980년: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)  
1980년~1982년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학석사)  
1982년~1988년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학박사)  
1988년 3월: 금성전기(주) 소재부품

연구소 선임연구원 (MIC 팀 팀장)

1990년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원  
1991년 5월: 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원  
1991년 8월: (주) LTI  
1995년 10월: 충남대학교 전파공학과 조교수  
1999년 10월~현재: 충남대학교 전파공학과 부교수  
[주 관심분야] 마이크로파 회로 및 시스템