

마이크로파대 광대역 다단 전력분배기의 설계방법과 구조에 관한 연구

박준석*, 김형석
순천향대학교 정보기술공학부

A Study on the Design and Structure of A Microwave Broadband Multi-Section Power Divider

Jun-Seok Park*, Hyeong-Seok Kim

Division of Information Technology Eng., Soonchunhyang Univ.

Abstract — A novel multi-section power divider configuration is proposed to obtain wide-band frequency performance up to microwave frequency region. Design procedures for the proposed microwave broadband power divider are composed of a planar multi-section three-ports hybrid and a waveguide transformer design procedures. The multi-section power divider is based on design theory of the optimum quarter-wave transformer. Furthermore, in order to obtain the broadband isolation performance between the two adjacent output ports, the odd mode equivalent circuit should be matched by using the lossy element such as resistor. The derived design formula for calculating these odd mode matching elements is based on the singly terminated filter design theory. The waveguide transformer section is designed to suppress the propagation of the higher order modes such as waveguide modes due to employing the metallic electric wall. Simulation and experiment show excellent performance of multi section power divider.

1. 서 론

본 논문에서는 RF, 마이크로파대 및 밀리미터파 대역용 광대역 전력분배기의 구조를 제시하고 다단 전력분배기 설계 공식을 유도하였다. 전력분배기 형태로서는 3-포트 하이브리드의 일종인 윌킨슨 전력분배기에 대한 다양한 연구가 진행되어졌다. [1]-[5] 이러한 윌킨슨 전력분배기는 주파수 대역 제한을 갖는 $\lambda/4$ 트랜스포머를 이용하기 때문에 역시 주파수 대역 제한을 갖는 제약이 발생한다. 따라서 이러한 동작 주파수 제한을 해결하기 위한 일환으로 다단 $\lambda/4$ 트랜스포머를 이용한 광대역 전력분배기에 대한 다양한 연구가 이루어졌다. [3]-[5] 그러나 이러한 다단 $\lambda/4$ 트랜스포머를 이용하여 광대역 전력분배기를 설계할 경우 출력 포트사이의 격리특성 구현하기 위해서는 역시 다단의 저항 소자들을 사용하여 다단 전력분배기의 기 모드(odd mode) 등가회로에 대한 정합회로를 구현하여야 하는 설계과정이 요구된다. 본 논문에서는 단일 종단된(singly terminated) 여파기 이론을 적용하여 이러한 기 모드(odd mode) 등가회로에 대한 정합회로를 구현하였다. [4], [5] 또한 마이크로파 및 밀리미터파 대역에서 이러한 광대역 평면형 전력분배기를 설계할 경우 전력분배기의 급속성 하우징으로 인한 도파관 모드(waveguide mode)의 전파로 인하여 의사모드 전파(spurious mode propagation)가 발생하여 전력분배기 특성이 설계시의 특성에서 벗어나는 결과를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 의사모드 전파를 발생시킬 수 있는 광대역 평면형 전력분배기의 급속성 하우징을 도파관 이론을 적용하여 도파관 모드가 감쇄되어 전파할 수 없도록 트랜스포머

형태로 설계한다.

본 논문에서 제시한 광대역 전력분배기 구조와 설계방법의 타당성을 입증하기 위하여 다양한 리플 특성을 갖는 광대역 전력분배기를 설계하고, 그 특성을 시뮬레이션 하였고, 마이크로파대역의 4-octave 대역특성을 갖는 광대역 전력분배기를 설계, 제작하여 그 특성을 측정하였다.

2. 설계 이론

그림 1은 제안된 광대역 다단 전력분배기의 등가 회로와 우/기(even/odd) 모드의 등가회로를 나타낸다. 그림 1(b)에 나타낸 3-포트 광대역 전력분배기의 우 모드 등가회로는 100Ω 의 종단 임피던스를 갖는 다단 $\lambda/4$ 트랜스포머 회로와 동일하다. 따라서 다단 전력분배기의 각 단의 전송선의 특성 임피던스 값은 주어진 입·출력 종단임피던스에 대하여 최적화된 다단 $\lambda/4$ 트랜스포머의 설계이론을 적용하여 구할 수 있다. [6] 그림 1(c)에 나타낸 기 모드 등가회로의 병렬 컨덕턴스 값의 결정은 전력분배기의 기 모드 등가회로에 대한 정합회로의 구현 문제에 해당된다. 전력분배기의 기 모드 등가회로에서 입력단의 종단조건이 단락회로이고 따라서 기 모드 등가회로에 대한 정합회로는 단락된 부하 임피던스에 대한 50Ω 입력 임피던스로의 정합회로를 구현하는 것으로 본 논문에서는 단일 종단된 필터 이론을 적용하여 이러한 전력분배기의 기 모드 등가회로의 정합을 위한 병렬 컨덕턴스의 설계 공식을 유도하였다. [4], [5]

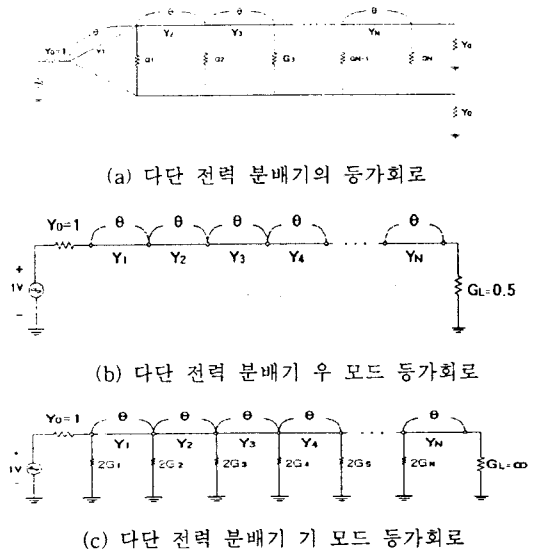
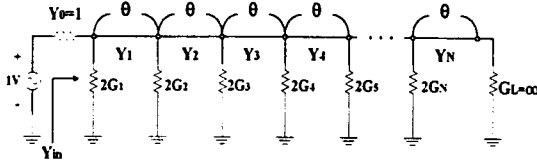
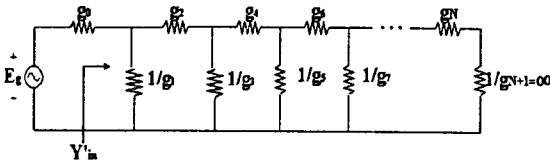


그림 1. 다단 3단자 전력 분배기

이러한 다단 전력분배기에 대한 단락된 부함 임피던스를 갖는 기 모드 등가회로에 대한 정합회로를 구현하기 위하여 그림 2(a)에 나타난 다단 전력분배기의 기 모드 회로에 대응하여 단일 중단 지역통과 원형여파기의 리액티브 소자를 모두 손실 소자인 저항으로 대체한 새로운 단일 중단된 원형회로를 그림 2(b)에 나타내었다.



(a)



(b)

그림 2. (a) 다단 전력 분배기의 기모드 등가회로
(b) 단일중단 1-포트 저항 회로

다단 전압분배기의 기 모드 정합회로의 설계 공식을 유도하기 위해서 그림 2에 나타난 두 회로의 중단 컨덕턴스를 각각 $g_{N+1} = \infty$ 와 $G_L = \infty$ 로 나타내고, 그림 2(a)에서 모든 어드미턴스 값을 소스 컨덕턴스 레벨로 정규화시키면 이때의 그림 2(a)에 나타난 다단 전력분배기의 기 모드 등가회로에 대한 입력 어드미턴스는 아래 식(1)과 같이 표현된다.

$$Y_{in} = 2G_1 + \frac{Y_1^2}{2G_2 + \frac{Y_2^2}{2G_3 + \frac{Y_3^2}{2G_4 + \dots + \frac{Y_{N-1}^2}{2G_N}}}} \quad (1)$$

그리고 동일한 조건에서 그림 2(b)에 나타난 저항성 소자로 구성된 단일 중단 지역통과 원형여파기 회로의 입력 어드미턴스는 아래 식(2)와 같이 표현된다.

$$Y_{in} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2 + \frac{1}{g_3 + \frac{1}{g_4 + \dots + \frac{1}{g_{N-1} + \frac{1}{g_N}}}}} \quad (2)$$

여기서의 $g_0, g_1, g_2, \dots, g_N$ 은 단일 중단된 체비세프 지역통과 원형여파기의 소자 값이다.[7] 다단 전력 분배기의 우수한 격리 특성을 위해 그림 2(a)에서 보여준 무한대의 중단 어드미턴스를 갖는 기 모드 등가회로의 입력 어드미턴스는 이미 기 모드 등가회로에서 결정된 전송선로의 특성 어드미턴스값에 대하여 전원에 정합이 되어야 한다. 단일 중단된 저항성 지역통과 원형여파기의 입력 어드미턴스는 정규화된 소스 측의 어드미턴스에 정합되도록 이미 그 원형여파기 소자 값이 결정되어 있으므로, 그림 2(a)에 나타난 다단 전력분배기의 병렬 저항 소자값은 식(1)과 식(2)의 등가관계로부터 유도될 수 있다. 식(1)과 식(2)의

이의 등가관계식을 유도하기 위하여 식(1)을 다음과 같은 분수 형태로 수정하고, 식(3)의 각 항과 식(1)의 각 항의 대응관계로부터 식(4)에 나타난 다단 전력분배기의 병렬 저항 소자 값을 유도할 수 있다.

$$Y_m = 2G_1 + \frac{1}{\frac{2G_2}{Y_1^2} + \frac{1}{\frac{2G_3 Y_1^2}{Y_2^2} + \frac{1}{\frac{2G_4 Y_2^2}{Y_1^2 Y_3^2} + \dots + \frac{Y_{N-1}^2 Y_{N-3}^2 \dots Y_2^2}{2G_N Y_{N-2}^2 Y_{N-4}^2 \dots Y_1^2}}} \quad (3)$$

$$G_1 = \frac{1}{2g_1}, \quad G_2 = \frac{Y_1^2 g_2}{2}$$

$$G_3 = \frac{Y_2^2 g_3}{2Y_1^2}, \quad \dots$$

$$G_N = \frac{Y_{N-1}^2 Y_{N-3}^2 \dots Y_3^2 Y_1^2 g_N}{2Y_{N-2}^2 Y_{N-4}^2 \dots Y_2^2} \quad \text{for } N = \text{짝수} \quad (4)$$

$$G_N = \frac{Y_{N-1}^2 Y_{N-3}^2 \dots Y_4^2 Y_2^2 g_N}{2Y_{N-2}^2 Y_{N-4}^2 \dots Y_1^2} \quad \text{for } N = \text{홀수}$$

식(4)에 나타난 다단 전력분배기의 컨덕턴스 공식은 식(5)에 나타난 반복적(recursive) 형태로 나타낼 수 있다.

$$G_i = \frac{1}{2g_i} \quad \text{and} \quad G_i = \frac{Y_{i-1}^2 g_{i-1} g_i}{2G_{i-1}} \quad (5)$$

where $i = 2, 3, \dots, N$

3. 마이크로파대 광대역 전력분배기 설계 예

본 논문에서 유도된 다단 전력분배기에 대한 일반화된 설계 공식을 이용하여 마이크로파대 평면형 3단 광대역 전력분배기를 설계하였다. 설계된 3단 광대역 전력분배기는 5 GHz ~ 20 GHz의 4-octave의 동작 주파수 영역을 갖고 우 모드 및 기 모드 동작 특성을 나타내는 전송선로의 특성 임피던스와 병렬 저항소자는 0.05 dB 리플을 갖도록 설계하였다.

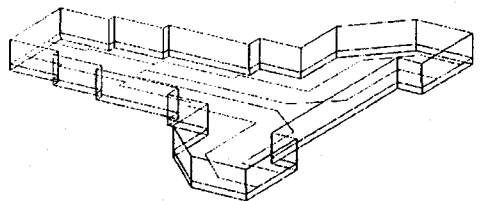


그림 3 도파관 모드가 억제된 마이크로파대 광대역 다단 전력분배기의 레이아웃

그림 3은 도파관 모드의 전파에 의한 "spike"의 발생이 억제된 마이크로파대 광대역 다단 전력분배기의 레이아웃을 나타낸다. 그림 3에 나타난 것처럼 전력분배기의 평면형 다단 전력분배기 전송선로단의 폭이 증가하고 있으므로 하우징에 해당하는 도파관의 폭을 균일하게 결정할 수 없다. 따라서 다단 도파관 트랜스포머의 형태로 하우징의 치수를 결정하고 하우징의 모든 단의 폭을 도파관 모드가 전력분배기의 동작 주파수 영역에서 감쇄모드로 동작하게끔 결정하였다. 결과적으로 결정된 하우징 치수에 의한 도파관 모드의 차단 주파수는 전력분배기의 입·출력단에서

가장 높으며, 따라서 설계된 광대역 다단 전력결합기 구조에서 "spike" 특성을 억제하는데 있어서 입·출력단의 하우징 치수가 결정적인 역할을 한다.

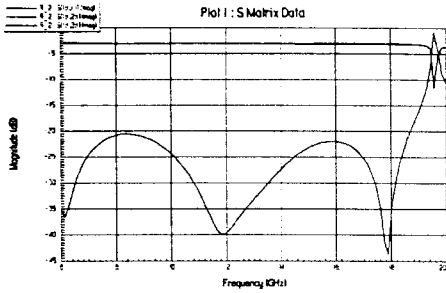


그림 4. 3단 전력분배기의 EM-시뮬레이션 결과

그림 4는 그림 3.과 같이 기하학적 구조를 바꾸어 수치 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 "spike" 특성이 억제되었음을 잘 나타내고 있다. 그림 5은 실제 제작된 마이크로파대 3단 광대역 평면형 전력분배기에 대한 측정결과를 나타낸다. 실제 제작에 사용된 기판은 유전율 2.2에 두께 20mil인 ROGERS사의 RT/duroid 5880을 사용하였다. 또한 본 논문에서 설계된 다단 전력분배기의 격리특성을 위한 병렬 저항소자로서 일반 RF 저항이 아닌 고가의 마이크로파대 저항을 사용하여야 한다. 그러나 이러한 마이크로파대 저항은 고가이며 저항소자값이 다양하지 않다. 따라서 이러한 점을 고려하여 본 논문에서는 3단 전력분배기 구조에서 두 전송선로가 병렬로 구성된 초단의 전송선로단을 초단 특성 임피던스의 병렬 특성 임피던스 값으로 단일 $\lambda/4$ 트랜스포머로 구현하여 사용 저항소자 수를 줄일 수 있었다. 그러나 설계된 마이크로파 저항소자를 구하기 어려워 전력분배기의 격리특성은 측정하지 못하고 회로 시뮬레이션을 통하여만 확인할 수 있었다.

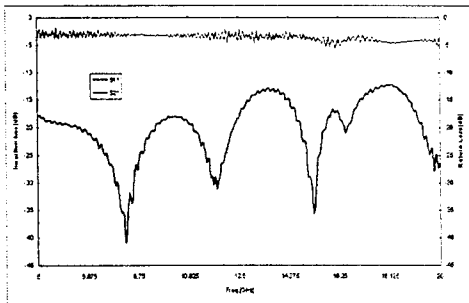


그림 5. 제작된 3단 전력 분배기의 측정 결과

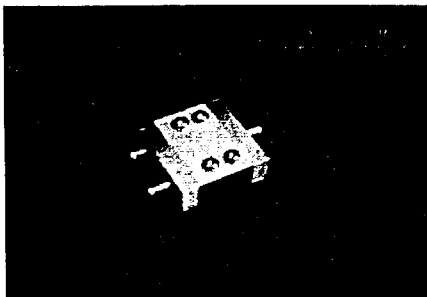


그림 6. 실제 제작된 3단 전력 분배기

4. 결론

본 논문에서는 RF, 마이크로파대 및 밀리미터파 대역용 광대역 전력분배기의 구조를 제시하고 다단 전력분배기의 설계를 위한 일반화된 설계공식을 유도하였다. 급속성 하우징으로 인한 도파관 모드의 전파로 인하여 의사모드 전파가 발생하여 전력분배기 특성이 설계시의 특성에서 벗어나는 결과를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 의사모드 전파를 발생시킬 수 있는 광대역 평면형 전력분배기의 급속성 하우징을 도파관 이론을 적용하여 도파관 모드가 감쇄되어 전파할 수 없도록 트랜스포머 형태로 설계하였다. 다양한 리플 특성을 갖는 광대역 전력분배기에 대한 설계 및 시뮬레이션 그리고 마이크로파대의 4-octave 대역특성을 갖는 광대역 전력분배기를 설계, 제작하고 특성측정을 통하여 본 논문에서 유도된 다단 전력분배기의 설계 공식의 타당성을 입증하였다. 마이크로파대 다단 광대역 전력분배기의 급속성 하우징으로 인하여 도파관 모드의 전파 발생으로 전력분배기의 주파수 특성이 악화된다. 이를 개선하기 위해 동작 주파수 영역에서 모든 도파관 모드가 감쇄모드로 동작하게끔 하우징의 치수를 결정할 때, 본 논문에서는 하우징을 순수 구형 도파관 전송선로로 간주하여 그 치수를 결정하였다. 그러나 더욱 개선된 주파수 특성을 얻기 위해서는 도파관, 즉 하우징에 마이크로 스트립 선로가 존재하는 경우에 대한 도파관 모드의 고유치(eigen value)를 전자장 수치해석 과정을 거쳐 도파관 모드가 감쇄모드로 동작되는 정확한 하우징의 치수를 결정하는 과정이 요구된다.

참고 문헌

- [1] E. J. Wilkinson, "An N-way hybrid power divider," *IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-8, pp. 116-118, January, 1960.
- [2] A. A. M. Saleh, "Planar electrically symmetric n-way hybrid power dividers/combiners," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-28, No. 6, pp.555-563, June 1980.
- [3] S. B. Cohn, "A class of broadband three-port TEM -mode hybrids," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-16, No. 2, pp. 110-116, February 1968.
- [4] S B Cohn, "Optimum design of stepped transmission-line transformers," *IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-3, pp. 16-21, April 1955.
- [5] Lee, C. Kim, K. Choi, J.S. Park, and D. Ahn, "A general design formula of multi-section power divider based on singly terminated filter design theory," *2001 International Microwave Symposium at Phoenix*, Vol. 2, May 2001.
- [6] 성정현, 김호섭, 박준석, 안달, 강광용, "단일중단 여파기를 이용한 다단 전력분배기 설계," *2001년도 춘계 마이크로파 및 전파학술대회*, pp. 233-236, 5월 12일, 2001년.
- [7] G. L. Matthaei, Leo Young and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures*, Artech House, pp. 104-108, 1980.