

비대칭 이중대역 전력분배기

김병철, 이수정, 김영
금오공과대학교 전자공학부

Unequal Dual-band Wilkinson Power Divider

Byung-Chul Kim, Soo-Jung Lee, Young Kim

School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology

요약 본 논문은 이중 대역에서 높은 분배 비율로 동작하는 비대칭 윌킨슨 전력 분배기의 설계에 대해 이론적인 접근 방법과 제작을 제안하였다. 비대칭 전력 분배기가 이중 대역에서 동작하도록 T-자형 전송선과 Monzon의 이론식을 이용하여 두 개의 직렬 마이크로 스트립라인을 구현하도록 제안하였고, 높은 분배비율을 가지는 분배기에서 높은 임피던스에서는 T-자형구조를 가지는 마이크로 스트립라인을 낮은 임피던스에서는 주기적 병렬 오픈 스텐트를 사용하여 구현하였다. 이 분배기의 이론적 설계의 검증을 위해, 5:1의 비대칭 듀얼 밴드 전력 분배기를 1GHz와 2GHz에서 시뮬레이션을 하고 측정을 하였다. 이 측정 값 들은 시뮬레이션과 거의 동일함을 보였다.

주제어 : 이중대역, 주기적 병렬 오픈 스텐트, 2-섹션전송선로, 비대칭 윌킨슨 전력분배기

Abstract This paper suggested a theoretical approach and an implementation for the design of an unequal Wilkinson power divider with a high dividing ratio operating at two-frequencies. The T-section transmission lines and the two-section of Monzon's theory are proposed to operate a dual-band application. To achieve the high dividing ratio divider, the high impedance line using a T-shaped structure and low impedance lines with periodic shunt open stubs are implemented. For the validation of this divider, a dual-band power divider with a high dividing ratio of 5 is simulated and measured at 1 GHz and 2 GHz. The measured performances of the divider are in good agreements with simulation results.

Key Words : Dual-band, periodic shunt open stub, two-sections transmission line, unequal Wilkinson power divider

1. 서론

윌킨슨 전력 분배기는 마이크로파 공학 및 다채널을 이용하여 무선 주파수 통신 시스템의 회로 설계의 분야에서 사용되며, 1960년 어니스트 J. 윌킨슨에 의해 소개되었다 [1]. 일반적으로 윌킨슨 전력분배기는 $\lambda/4$ 전송선

을 이용하는 싱글밴드 대칭 전력 분배기지만 대칭 전력 분배기와 이중 대역, 다중 대역 등에서 동작이 가능한 윌킨슨 전력 분배기 들도 제안되고 있다. 비대칭 듀얼 밴드 전력 분배기는 최근 T-자형, π -자형, 집중 소자 RLC, coupled lines, 두 개의 직렬 마이크로 스트립라인 변환기, 병렬 스텐트 전력 분배기와 같은 많은 응용 프로그램에

* 이 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 지원된 논문임
Received 18 February 2014, Revised 18 March 2014
Accepted 20 April 2014
Corresponding Author: Young Kim (Kumoh National Institute of Technology)
Email: youngk@kumoh.ac.kr

© The Society of Digital Policy & Management. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 보고되고 있다. 두 개의 직렬 마이크로 스트립라인에서는 Monzon의 이론 [2]에 기초하여 듀얼 밴드 윌킨슨 전력 분배기 [3-8]가 개발되었다. 그러나 전력분배기의 분배비율이 $k^2 > 3$ 일 때, 높은 임피던스 값을 갖는 마이크로 스트립 전송선로는 실질적으로 구현하기가 어렵다. 높은 특성 임피던스를 구현하기 위해 그루브 구조의 마이크로 스트립(grooved substrate microstrip), 듀얼 전송선로, 단락 스테브를 갖는 평행 결합 선로 등이 제안되어졌다. 또한 낮은 임피던스를 사용하는 소형화된 전력 분배기는 주기적 연결을 이용한 저속 파 구조(slow wave structure)의 분산적 분석법으로 구현되어지고 있다.

본 논문에서 두 주파수에서 동작하는 분배비율이 높은 5:1의 비대칭 윌킨슨 전력 분배기를 제안한다. 비대칭 듀얼 밴드 전력 분배기를 설계하기 위해, $\lambda/4$ 변환기는 듀얼 밴드인 두 개의 직렬 마이크로 스트립라인 전력 분배기로 대체된다. 높은 분배비율 때문에 듀얼 밴드 비대칭 전력 분배기를 설계하는데 있어 높은 임피던스에서는 T-자형 전송선로를 이용하고 낮은 임피던스에서는 병렬 연결 전송선로를 이용하여 설계 및 제작하였다.

2. 이론과 설계

2.1 전송선로 이론

높은 분배비율을 가지는 이중 대역 비대칭 전력 분배기를 구현하기 위해서는 여러 단계의 과정이 필요하다. 첫 번째 단계는 마이크로 스트립 선로로 구현 가능한 특성 임피던스와 R의 값을 결정하는 것이고, 두 번째 단계는 듀얼 밴드에서 높은 임피던스 선로를 T-자형 전송선로로 변환하는 것, 세 번째는 Monzon의 이론을 적용하여

$\lambda/4$ 싱글 밴드 마이크로 스트립라인을 이중 대역인 두 개의 직렬 마이크로 스트립라인으로 변환시키는 것이고, 마지막 단계는 낮은 임피던스라인을 이용하여 커패시터를 주기적으로 연결한 전송선로를 구현한다.

첫 번째 단계에서 높은 분배 비율을 가지는 비대칭 전력 분배기 예시의 높은 임피던스 값 Z_1 은 마이크로 스트립라인으로 구현하기가 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 [Figure 1]에서와 같이 포트 2와 포트 3을 바라본 입력 임피던스 Z_{i3} 와 Z_{i4} 를 낮은 임피던스 값으로 디자인 하였다. 비대칭 전력분배기의 회로도 식은 다음과 같이 정의한다.

$$Z_{i1} = k^2 Z_{i2}, \quad Z_{i3} = \frac{Z_0}{k}, \quad Z_{i4} = \frac{Z_0}{k^3} \quad (1)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{(1+k^2)}{k}} Z_0 \quad (2)$$

$$Z_3 = \frac{Z_0}{\sqrt{k}}, \quad Z_4 = \frac{Z_0}{\sqrt{k^3}} \quad (3)$$

$$R = \frac{(1+k^2)Z_0}{k^3} \quad (4)$$

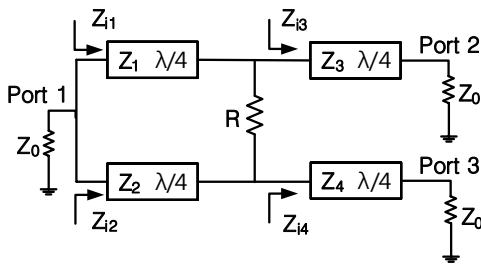
이 식들로부터, 특성 임피던스 값은 기존의 비대칭 전력 분배기보다 낮은 값을 가진다. 그러나 위 식을 이용하여 낮은 임피던스 값을 구현함에도 불구하고 임피던스 Z_1 의 값은 여전히 전송선로의 폭을 설계하기가 어렵기 때문에 임피던스 Z_1 은 듀얼 밴드 T-자형 전송선로로 변환시킨다. 전기적 길이 $\theta_{1(f)}$ 과 $\theta_{2(f)}$ 는 [7]에 의해 정의되고 특성 임피던스 Z_{n1} 과 Z_{n2} 의 듀얼 밴드 변환기의 식은 다음과 같다.

$$Z_{n1} = \frac{Z_n}{\tan \theta_{n1(f1)}} \quad (5)$$

$$Z_{n2} = 0.5 Z_{n1} \tan^2 \theta_{n2(f1)} \quad (6)$$

[Figure 2(b)]는 $\lambda/4$ 선로에 대한 T-자형 전송선로의 등가회로도 이다. 위 식으로부터 $\lambda/4$ 선로는 특성 임피던스 Z_{n1} 과 Z_{n2} 를 가진 T-자형 마이크로 스트립라인으로 변환된다.

세 번째 단계에서는 Monzon의 이론을 적용하여 식



[Fig. 1] Schematic of an unequal Wilkinson power divider

(1)-(6)으로 부터, 기존의 윌킨슨 전력 분배기 회로의 단일 주파수를 가진 하나의 섹션을 임의의 두 주파수 f_1 과 f_2 에서 두 개의 직렬 마이크로 스트립라인을 가진 전송선로로 만드는 것이다 [2]. [Figure 2(c)] 는 Monzon의 식으로부터 마이크로 스트립라인 선로를 만들기 위해 입력 및 출력 특성 임피던스로 부터 특성 임피던스 Z_1 과 Z_2 의 값들을 유도할 수 있다. 이 식으로부터 $\alpha = (\tan(\beta_1 l))^2$ 이고 β 는 위상 상수, 길이 l_1 과 l_2 은 Z_1 과 Z_2 에서 같다.

마지막 단계에서는 커패시터를 병렬 연결한 전송선로 (capacitive loaded transmission line, CLTL)를 구현하는 것이다. 높은 임피던스 값을 가지는 Z_n 은 입력 임피던스를 낮은 임피던스 값으로 디자인하고 다시 T-자형 전송선로로 구현을 했으나 낮은 임피던스 값을 가지는 Z_{05} 와 Z_{07} 은 넓은 폭의 전송선로를 가지기 때문에 역시 마이크로 스트립으로 구현하기가 어렵다. 낮은 임피던스 라인으로 구현할 수 있도록 N개의 단위 셀을 가진 주기적 커패시터 병렬연결 전송선로(CLTL)를 설계하였다. 단위 셀 (unit cell) 등가회로는 T-자형 전송선로와 같이 길이 $d/2$ 를 가지는 두 개의 직렬 마이크로 스트립라인과 하나의 병렬 커패시터가 연결된 구조이며 [8], 단위 셀의 전송선로 길이 d 와 커패시턴스 C_p 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [8].

$$d = \frac{Z_{0CLTL} \cdot \theta_{CLTL} \cdot v_{cTL}}{2\pi f_0 N Z_{cTL}} \quad (7)$$

$$C_p = \frac{\theta_{CLTL} (Z_{cTL}^2 - Z_{0CLTL}^2)}{2\pi f_0 N Z_{cTL}^2 Z_{0CLTL}} \quad (8)$$

$$2\pi f_0 C_p = \frac{1}{Z_{cOS}} \tan\left(\frac{2\pi f_0}{v_{cOS}} \cdot l\right) \quad (9)$$

여기에서, Z_{cOS} 는 특성 임피던스이고 v_{cOS} 는 위상 속도이며, l 은 오픈 스테르브로 구현될 물리적 길이이다. [Figure 4]는 주기적 커패시터의 병렬연결 전송선로의 단위 셀과 일련으로 연결된 CLTL이다. 위 식들로부터 낮은 특성 임피던스 $Z_{04}=11.20$ 옴과 $Z_{07}=10.44$ 옴을 높은 임피던스로 변경할 수 있다.

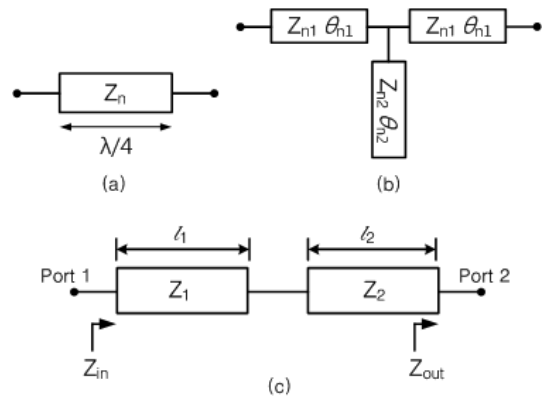
2.2 설계

분배 비율이 $k^2 = 5$ 이고 단위 셀이 $N = 5$ 인 듀얼 밴드 비대칭 윌킨슨 전력 분배기를 식 (1) - (9)를 이용하여 각각의 임피던스 값들을 구하면,

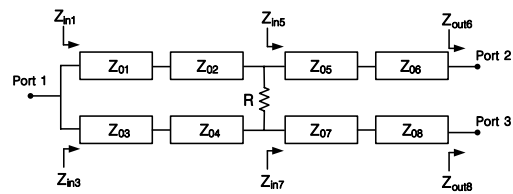
$R = 26.83 \Omega$, $f_1 = 1 \text{ GHz}$, $f_2 = 2 \text{ GHz}$, $Z_1 = 81.9 \Omega$, $Z_2 = 16.38 \Omega$, $Z_3 = 33.44 \Omega$, $Z_4 = 14.95 \Omega$, $Z_{n1} = 47.29 \Omega$, $Z_{n2} = 70.93 \Omega$, $Z_{01} = 119.75 \Omega$, $Z_{02} = 56.02 \Omega$, $Z_{03} = 23.95 \Omega$, $Z_{04} = 11.20 \Omega$, $Z_{05} = 29.29 \Omega$, $Z_{06} = 38.18 \Omega$, $Z_{07} = 10.44 \Omega$, $Z_{08} = 21.43 \Omega$ 특성 임피던스 Z_1 대신 Z_{n1} 과 Z_{n2} 를 사용하고 낮은 임피던스인 Z_{04} 와 Z_{07} 대신 CLTL을 이용하여 마이크로스트립 라인을 구현한다.

<Table 1> CLTL microstrip line element dimensions for low characteristic impedances.

	Z_{04}	Z_{07}
$W_{cTL}(\text{mm})$	9	5.65
$d(\text{mm})$	0.585	0.625
$W_{cOS}(\text{mm})$	0.7	0.7
N	5	5



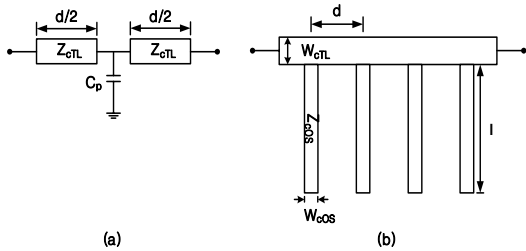
[Fig. 2] Equivalent circuits (a) $\lambda/4$ (b) T-shaped transmission line (c) two-section dual-band transformer.



[Fig. 3] Schematic of unequal dual-band Wilkinson divider.

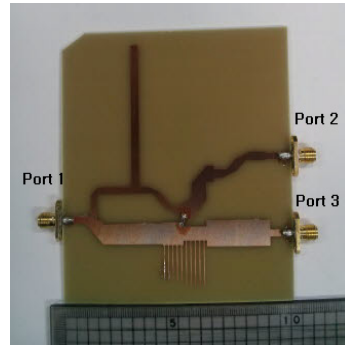
3. 실험과 시뮬레이션

유전율 $\epsilon_r = 4.3$, $H = 1.6$ mm, $T = 0.035$ mm, $\tan\delta = 0.0009$ 인 이중 대역 비대칭 전력 분배기를 제작 하였으며 전력 분배기는 $k^2 = 5$ 이고 주파수 1 GHz와 2 GHz에서 동작한다.

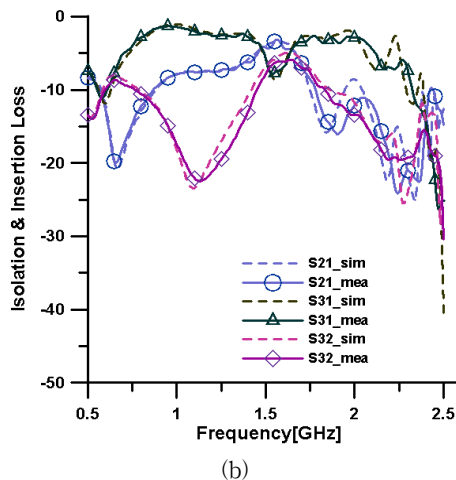
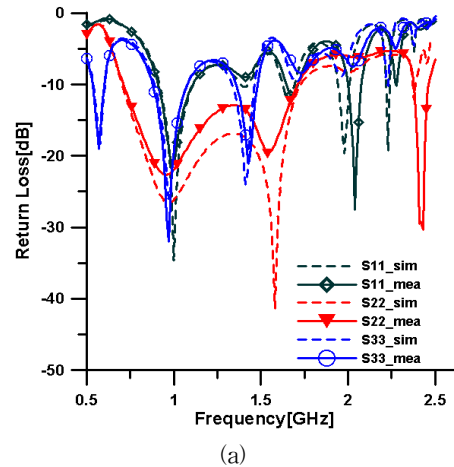


[Fig. 4] Capacitive loaded transmission line (a) unit cell (b) configuration.

[Figure 5]는 5:1비율의 높은 임피던스와 낮은 임피던스에서의 전송선로와 두 개의 직렬 마이크로 스트립라인 전송선로를 가진 비대칭 이중 대역 전력 분배기이다. 시뮬레이션은 AWR사의 Microwave Office를 이용하였다. 제작된 전력분배기 PCB는 엔질런트 네트워크 HP8753을 사용하여 측정하였으며, [Figure 6]으로부터, 측정 값 $|S_{21}|$ 은 1 GHz에서 -7.88 dB, 2 GHz에서 -11.11 dB이고, $|S_{31}|$ 은 1 GHz에서 -1.41 dB, 2 GHz에서 -3.03 dB이다. 두 포트사이에서의 전력 비율은 각각 1 GHz에서 -6.47 dB, 2 GHz에서 -8.07 dB로서 시뮬레이션에 비해 40 MHz 시프트 뒀과 동시에 2 GHz에서 1.26 dB 정도의 오차가 있음을 확인 할 수 있었다. 이것은 전력 분배기 제작 시 오차에서 나온 것으로 판명된다. 반사 손실은 두 주파수에서 각각 $|S_{11}|$ 은 -21 dB, -27.6 dB 이며 $|S_{22}|$ 는 -21.9 dB, -6.18 dB 그리고 $|S_{33}|$ 은 -19.2 dB, -7.64 dB로 2 GHz에서의 반사 손실이 좋지 않음을 보여 주고 있다. 고립 손실 $|S_{32}|$ 은 각각 -17.4 dB 와 -13.4 dB로 손실 값들은 대체로 2 GHz에서 15 dB 보다 적음을 보여준다.



[Fig. 5] 5:1 Unequal dual-band Wilkinson power divider



[Fig. 6] Simulation and measurement of S-parameter (a) Return Loss (b) Isolation & Insertion Loss

4. 결론

본 논문은 높은 임피던스와 낮은 임피던스에서 동작할 수 있는 전력분배기의 이론을 바탕으로 5:1의 높은 분배 비율을 가지는 이중 대역 비대칭 윌킨슨 전력 분배기를 설계 및 제작하였다. T-자형 전송선로는 높은 임피던스에 CLTL은 낮은 임피던스에 각각 적용하여 구현하였으며 주파수는 1 GHz와 2 GHz이다.

두 출력 포트에서 -6.47 dB와 -8.07 dB의 전력 비율을 가지며 1 GHz에서의 -19 dB 이상의 반사 손실을 가지나 2 GHz에서는 출력포트의 반사 손실이 -7 dB 이하인 것을 볼 수 있다. 고립 손실 역시 2 GHz에서 -13 dB 정도로 2 GHz에서의 손실 값들은 -15 dB 이하임을 볼 수 있다. 따라서 k^2 이 3보다 높은 분배 비율을 가지는 비대칭 전력 분배기 들을 설계함에 있어 높은 임피던스는 T-자형과 두 개의 직렬 마이크로 스트립라인을 이용하고 낮은 임피던스는 병렬연결 오픈 스티브를 이용하여 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper was supported by Research Fund, Kumoh Institute of Technology

REFERENCES

- [1] E. Wilkinson, "An N-way hybrid power divider," IEEE Trans. Microw. Theory Tech, Vol. 8, pp. 116-118, Jan. 1960.
- [2] C. Monzon, "A small dual frequency transformer in two sections," IEEE Trans. Microw. Theory Tech, Vol. 51, No. 4, pp. 1157-1161, Apr. 2003.
- [3] L. N. Chen, H. H. Zie, Y. C. Jiao, and Fu-Shun Zhang, "A novel 4:1 unequal dual-frequency Wilkinson power divider," IEEE Microwave and Millimeter wave technology, pp. 1290-1293, 2010.
- [4] X. Li, Y.-J. Yang, L. Yang, S.-X. Gong, X. Tao, Y. Gao, K. Ma, and X.-L. Liu, "A novel design of dual-band unequal wilkinson power divider," Progress in Electro magnetics Research C, Vol. 12,

pp. 93-100, 2010.

- [5] T. Yang, J.-X. Chen, and Q. Xue, "Novel approach to the design of unequal power divider with high-dividing ratio," Microwave and optical technology letters, Vol. 51, pp. 1240-1243, May. 2009.
- [6] Y. Wu, Y. Liu, Y. Zhang, J. Gao, and H. Zhou, "A dual band unequal Wilkinson power divider without reactive components," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, Vol. 57, pp. 126-222, Jan. 2009.
- [7] N. Dib, "Design and analysis of dual-frequency modified 3-way bagley power dividers," Progress in Electromagnetics Research C, Vol. 20, pp. 67-81, 2011.
- [8] Y. Kim, "A 10:1 unequal Gysel power divider using a capacitive loaded transmission line," Progress in Electromagnetics Research letters, Vol. 32, pp. 1-10, 2012.

김 병 철(Byung-Chul Kim)



- 1982년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1993년 8월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1982년 2월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수
- 관심분야 : RF 및 Microwave 전력 증폭기 및 선형화기 설계, 광대역

전력증폭기 설계

· E-Mail : bckim@kumoh.ac.kr

이 수 정(Soo-Jung Lee)



- 1994년 2월 : 경남대학교 물리학과 (학사)
- 1996년 2월 : 경남대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : Polytechnic Institute of NYU, Electrical engineering (공학석사)

· 2012년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학과 박사과정

· 관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계

· E-Mail : goldenrain@live.co.kr

김 영(Young Kim)



- 1988년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1988년 1월 ~ 1993년 5월 : 이즈텔 시스템즈(주) 연구소 선임연구원
- 1993년 6월 ~ 1998년 2월 : 삼성전자(주) 정보통신사업본부 선임연구원
- 1998년 3월 ~ 2003년 2월 : 두원공과대학 정보통신과 조교수
- 2003년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 부교수
- 관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계
- E-Mail : youngk@kumoh.ac.kr