

광대역 임의의 위상차를 갖는 대역통과 결합 선로 전력분배기

Bandpass-Filtering Coupled-Line Power Divider with Broadband Arbitrary Phase Difference

김 수 연 · Girdhari Chaudhary* · 정 용 채

Suyeon Kim · Girdhari Chaudhary* · Yongchae Jeong

요 약

본 논문은 서로 다른 두 경로 사이에 광대역에 걸쳐 임의의 위상 차이를 갖는 대역통과 결합 선로 전력 분배기의 설계를 제시하였다. 제안된 회로는 윌킨슨 전력 분배기와 서로 다른 상대주파수 대역폭을 갖는 N 차 결합 선로 대역통과 여파기로 구성되어 있다. N 차 결합 선로 대역통과 여파기의 상대주파수 대역폭을 제어하여 광대역에서 일정한 위상 차이를 구현하였다. 제안된 회로 분석을 통해 설계 방정식을 유도하였고, 회로의 타당성을 보이기 위해 180° 의 위상 차이를 갖는 전력분배기를 설계 및 제작하여 2.90 GHz의 중심주파수 및 310 MHz의 대역폭에서 $180^\circ \pm 3.22^\circ$ 의 위상차와 ± 0.2 dB의 진폭 오차 성능을 얻었다.

Abstract

This paper presents an approach for the design of a bandpass-filtering coupled-line power divider with a broadband arbitrary phase difference between two paths. The proposed circuit consists of a Wilkinson power divider and N^{th} -order coupled line bandpass filters(BPFs) having different fractional bandwidths(FBWs). Through control of the FBWs of the N^{th} -order BPFs, a constant phase difference over broadband can be obtained. From the analysis, the design equations of the proposed circuit are derived. To prove the validity of the proposed circuit, a power divider having a phase difference of 180° is designed and fabricated. From the measurement results, the phase and magnitude imbalances are $180^\circ \pm 3.22^\circ$ and ± 0.2 dB, respectively, at the center frequency of 2.90 GHz with an operation bandwidth of 310 MHz.

Key words: Arbitrary Prescribed Constant Phase Difference, Coupled Line, Filtering Power Divider, Fractional Bandwidth

I. 서 론

위상 배열 시스템, 빔 포밍 네트워크, 무선 통신 시스템을 위해 광대역에 걸쳐 출력 단자 간의 임의로 일정하게 규정된 위상차를 갖는 전력 분배기에 대한 연구가 많이

요구되고 있다. 전력 분배기의 출력 단자 사이의 일정한 위상 차이를 구현하기 위해서는 전송선로를 추가해야 한다. 그러나 일반적인 기법은 두 전송선로 간의 위상 기울기(slope parameter)의 차이로 인해 중심주파수 근처에서만 원하는 위상차 특성을 보인다.

「본 논문은 과학기술정보통신부 및 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2020R1A2C20120587) (2019R1A6A1A09031717).」
전북대학교 전자정보공학부(Division of Electronics and Information Engineering, Jeonbuk National University),

*전북대학교 IT융합연구센터(IT Convergence Research Center, Jeonbuk National University)

· Manuscript received November 14, 2020 ; Revised November 26, 2020 ; Accepted December 22, 2020. (ID No. 20201114-005S)

· Corresponding Author: Yongchae Jeong (e-mail : ycjeong@jbnu.ac.kr)

최근에는 주파수 선택성과 전력분배와 같은 다중 기능을 제공하는 대역통과 전력분배기를 이용한 연구가 많이 진행되고 있다^{[1]~[3]}. 일반적인 전력분배기 대신 $N/4$ 의 길이를 갖는 전송선로를 이용하여 두 선로 간의 다른 위상 차이를 갖는 회로들이 제안되기도 하였다. 제안된 회로를 통해 광대역에 걸쳐 좋은 전력분배율을 구현할 수 있지만 90° 및 180° 와 같은 특정한 위상차를 갖는 회로만 구현된다는 제한이 있다^{[4],[5]}.

임의로 일정한 위상 차이를 갖는 대역통과 전력분배기에 대한 연구들도 많이 진행되었다. 일반적으로 임의의 위상 차이를 갖는 전력분배기 구조는 중심주파수에서만 위상 차이를 갖는다는 한계를 갖는다^[6]. 광대역에서 일정한 위상 기울기 특성을 지닌 위상 천이기가 복합 공진기를 이용해 구현되었지만, 이 회로는 위상 편차 특성이 좋지 않다는 단점이 있다^[7]. 임의로 일정하게 규정된 위상차를 갖는 대역통과 전력분배기에 대한 연구도 진행되었지만, 임의로 중단된 임피던스를 조절할 수 없다는 제한이 있다^[8].

본 논문은 대역통과 결합 선로 전력분배기를 이용해 광대역에 걸쳐 임의로 설정한 위상차를 얻을 수 있음을 보인다. 광대역에서 일정한 위상차는 전력분배기의 출력단에 부착된 대역통과 여파기들의 상대주파수 대역폭 (fractional bandwidth: FBW)을 조절하여 구현하였다. 제안된 회로의 타당성을 입증하기 위해 결합 선로로 구현된 대역통과 전력분배기의 분석을 통해 위상 기울기의 방정식을 유도하였으며, 결합 선로의 임피던스의 값을 구할 수 있는 방정식도 유도하였다.

II. 설계방법

그림 1은 제안된 전력분배기의 회로를 나타내고 있다. 제안된 회로는 동일한 전력분배율을 갖는 윌킨슨 전력분배기와 N 차 결합 선로 대역통과 여파기(bandpass filter: BPF), 출력 단자 간의 위상 차이를 구현할 수 있는 추가적인 전송선로로 구성된다. 이때, 모든 단자는 50Ω 임피던스로 중단되었으며, 단자 2와 1을 지나는 경로를 경로 A, 단자 3과 1을 지나는 경로를 경로 B로 나타내었다.

그림 2는 그림 1의 하위 등가회로로 신호가 전송되는 동안 출력 단자와 입력 단자 간의 경로를 의미한다. 제안

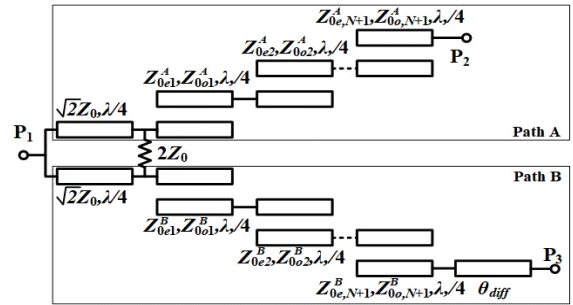
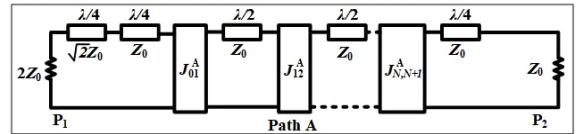
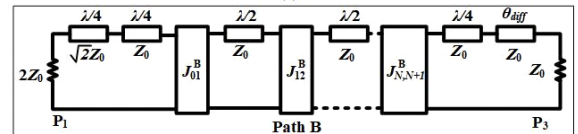


그림 1. 제안된 광대역 임의의 위상차를 갖는 대역통과 결합 선로 전력분배기 회로 다이어그램

Fig. 1. Circuit diagram of proposed bandpass filtering coupled line power divider with broadband arbitrary phase difference.



(a) 단자 1과 2사이의 경로 A
(a) Path A between ports 1 and 2



(b) 단자 1과 3사이의 경로 B
(b) Path B between ports 1 and 3

그림 2. 입력 단자와 출력 단자 간의 하위 등가네트워크
Fig. 2. Equivalent sub-networks between input and output ports.

된 전력 분배기는 출력단에는 동일한 통과대역 리플(ripple)을 갖지만, 서로 다른 상대주파수 대역폭을 갖는 N 차 대역통과 여파기가 연결되어 있다. 중심 주파수에서 출력 단자 간의 위상차(θ_{diff})는 입력 단자와 각 출력 단자의 위상 차이로 식 (1)과 같이 정의할 수 있다. 이때 θ_{diff} 는 경로 B에서 위상 차이를 위해 추가된 전송선로의 전기적 길이이다.

$$\Delta\phi = \angle S_{21} - \angle S_{31} = \theta_{diff}(f_0) \quad (1)$$

광대역에 걸쳐 일정한 위상차를 얻기 위해서는 입출력 단자 간의 위상 기울기가 같아야 한다. 따라서 식 (2)와

같이 입출력 단자 간의 동일한 군지연(group delay)을 가져야 광대역에서 일정한 위상 차이를 얻을 수 있다.

$$\left. \frac{d\angle S_{21}}{df} \right|_{f=f_0} = \left. \frac{d\angle S_{31}}{df} \right|_{f=f_0} \quad (2)$$

N 이 홀수일 경우, 제안된 N 차 대역통과 결합 선로의 군지연은 식 (3)과 같이 구할 수 있으며, A 와 B 는 식 (4)를 통해 구할 수 있다⁹⁾.

$$\left. \frac{d\angle S_{21}}{df} \right|_{f=f_0} = -\frac{A}{f_0\Delta_A} - \pi^2 B\Delta_A \quad (3a)$$

$$\left. \frac{d\angle S_{31}}{df} \right|_{f=f_0} = -\frac{A}{f_0\Delta_A} - \pi^2 B\Delta_B - \frac{\theta_{diff}}{f_0} \quad (3b)$$

$$A = 2 \sum_{i=1}^{m-1} g_i + g_m \quad (4a)$$

$$B = \frac{\prod_{i=1}^{m-1} g_i + 2 \left[\sum_{i=1}^{m-1} \left(\prod_{j=1}^{m-1} g_j / g_i \right) \right] g_m}{4 \prod_{i=1}^{m-1} g_i f_0}, m = \frac{(N+1)}{2} \quad (4b)$$

N 이 짝수일 경우, 제안된 N 차 대역통과 결합 선로의 군지연은 식 (5)와 같이 구할 수 있다⁸⁾. C, D, E 그리고 F 는 식 (6)과 같이 구할 수 있다. f_0 는 중심주파수, g_i 는 저역여파기 기준형 값, 각 Δ_A 와 Δ_B 는 경로 A와 경로 B의 상대주파수 대역폭을 의미한다.

$$\left. \frac{d\angle S_{21}}{df} \right|_{f=f_0} = -\frac{g_{N+1}C\Delta_A\pi^2}{2D} - \frac{E\Delta_A\pi^2}{2D} - \frac{2F}{(1+g_{N+1})f_0\Delta_A} \quad (5a)$$

$$\left. \frac{d\angle S_{31}}{df} \right|_{f=f_0} = -\frac{g_{N+1}C\Delta_B\pi^2}{2D} - \frac{E\Delta_B\pi^2}{2D} - \frac{2F}{(1+g_{N+1})f_0\Delta_B} - \frac{\theta_{diff}}{f_0} \quad (5b)$$

$$C = \prod_{i=1}^{N/2} g_{2i} \left[\sum_{k=1(i \neq k)}^{N/2} \frac{\prod_{i=1}^{N/2} g_{2i-1}}{g_{2k-1}} \right] \quad (6a)$$

$$D = (1+g_{N+1}) \prod_{i=1}^N g_i \quad (6b)$$

$$E = \prod_{i=1}^{N/2} g_{2i-1} \left[\sum_{k=1(i \neq k)}^{N/2} \frac{\prod_{i=1}^{N/2} g_{2i}}{g_{2k}} \right] \quad (6c)$$

$$F = \sum_{i=1}^{N/2} g_{2i-1} + g_{N+1} \sum_{i=1}^{N/2} g_{2i} \quad (6d)$$

설계 조건으로 주어진 위상차(θ_{diff})와 Δ_A 와 Δ_B 를 이용해 대역통과 여파기의 회로 매개변수들(Z_{0e}, Z_{0o})을 구할 수 있다¹⁰⁾. 그림 3의 대역통과 여파기의 등가회로를 통해 입력 어드미턴스(Y_{01})와 중간 공진기의 서셉턴스(B_{bs})를 구할 수 있으며, 이를 통해 첫 번째 공진기의 서셉턴스(B_1)를 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$B_1(\omega) = B_{as}(\omega) + B_{bs}(\omega) \quad (7a)$$

$$B_1(\omega) = \left(\frac{J_{01}^2}{Y_1} \left(1 + \frac{G_S^2}{Y_1^2} \right) + 2Y_1 \right) \frac{\pi}{2} \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad (7b)$$

또한, 부하 어드미턴스(Y_{1L})와 중간 공진기의 서셉턴스(B_{bL})를 통해 마지막 공진기의 서셉턴스(B_n)를 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$B_n(\omega) = B_{aL}(\omega) + B_{bL}(\omega) \quad (8a)$$

$$B_n(\omega) = \left(\frac{J_{N,N+1}^2}{Y_1} \left(1 - \frac{G_L^2}{Y_1^2} \right) + 2Y_1 \right) \frac{\pi}{2} \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad (8b)$$

앞서 구한 식 (7)과 식 (8)을 이용해 첫 번째 공진기와 마지막 공진기의 기울기 매개변수들(b_1, b_n)를 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$b_1 = \frac{\omega_0}{2} \left. \frac{dB_1}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{J_{01}^2}{2Y_1} \left(1 - \frac{G_S^2}{Y_1^2} \right) + Y_1 \right) \quad (9a)$$

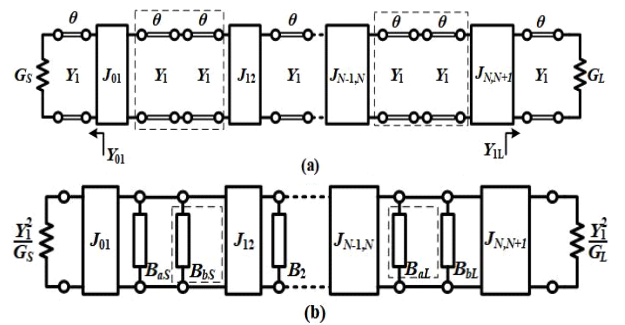


그림 3. (a) 병렬 결합 선로 대역통과 여파기의 등가회로와 (b) 변화된 (a)의 등가회로
Fig. 3. (a) Equivalent circuit of parallel-coupled line BPF and (b) modified equivalent circuit model of (a).

$$b_n = \frac{\omega_0}{2} \frac{dB_n}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{J_{N,N+1}^2}{2Y_1} \left(1 - \frac{G_L^2}{Y_1^2} \right) + Y_1 \right) \quad (9b)$$

식 (9)를 이용해 대역통과 여파기의 회로 매개변수를 식 (10)과 같이 구할 수 있다. x 는 경로 A 와 B 를 의미한다.

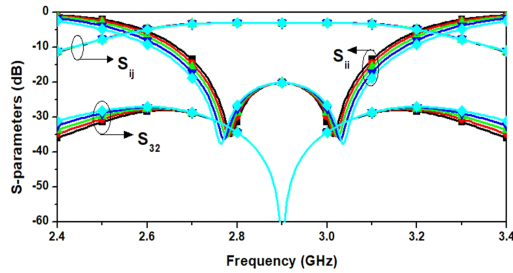
$$J_{01}^x = \frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{\pi \Delta_x}{2g_1}}, J_{N,N+1}^x = \frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{\pi \Delta_x}{2g_N g_{N+1}}} \quad (10a)$$

$$J_{i,i+1}^x = \frac{1}{2Z_0} \frac{\pi \Delta_x}{\sqrt{g_{i-1} g_i}}, i=2,3,\dots,N \quad (10b)$$

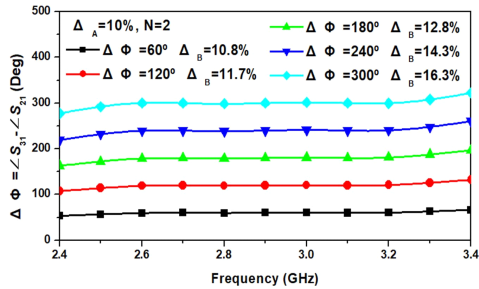
이 설계 방정식을 이용한 180°의 위상 차이를 갖는 2차 대역통과 전력분배기에 대한 S_{21} 과 S_{31} 의 위상 특성 결과들을 그림 4에 나타냈다. 이를 통해 Δ_B 를 조절하면 광대역에 걸쳐 일정한 위상차를 구현할 수 있음을 확인하였다.

III. 시뮬레이션 및 측정 결과

제안된 회로의 타당성을 입증하기 위해 180°의 위상



(a) S-파라미터 특성
(a) S-parameters characteristics



(b) 위상 특성
(b) Phase characteristics

그림 4. $N=2$ 및 $\Delta_A=10\%$ 인 제안 전력분배기의 시뮬레이션 특성

Fig. 4. Simulation results of proposed power divider with $N=2$ and $\Delta_A=10\%$.

차이를 갖는 2.90 GHz의 중심주파수 및 310 MHz의 대역폭의 2차 대역통과 결합 선로 전력분배기를 설계하였다. 통과대역 리플은 0.043이고, Δ_A 는 10%이다.

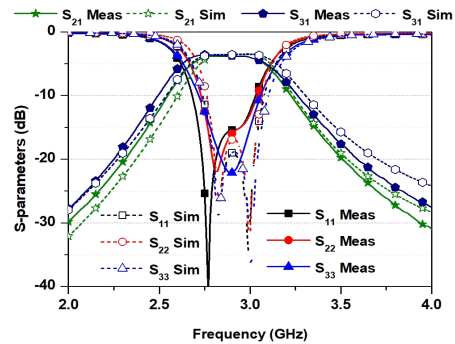
설계 방정식을 통해 계산된 회로 매개변수는 표 1에 나타냈다. 회로는 유전율이 3.2이고, 두께가 31 mil인 Taconic사의 TLY-5-0310-CL1에 제작되었다. 시뮬레이션은 ANSYS사의 HFSS 19를 이용하였다.

그림 5는 시뮬레이션 및 측정된 S-파라미터 특성들을

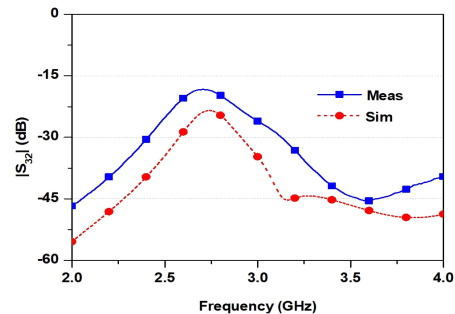
표 1. 설계된 전력분배기의 회로 매개변수

Table 1. Circuit parameters of a designed power divider.

Path A	Δ_A (%)	Z_{0e1}, Z_{0o1} (Ω)	Z_{0e2}, Z_{0o2} (Ω)	Z_{0e3}, Z_{0o3} (Ω)
	10	86.15, 37.51	66.48, 40.34	86.15, 37.51
Path B	Δ_B (%)	Z_{0e1}, Z_{0o1} (Ω)	Z_{0e2}, Z_{0o2} (Ω)	Z_{0e3}, Z_{0o3} (Ω)
	12.8	92.66, 37.63	72.32, 38.86	92.66, 37.63



(a) S-파라미터 특성
(a) S-parameters characteristics



(b) 격리 특성
(b) Isolation characteristics

그림 5. 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 5. Simulation and measurement results.

보여주고 있다. 그림 5(a)를 통해 대역 내 반사손실은 12 dB보다 크고, 삽입손실은 회로에 내포되어있는 윌킨슨 전력분배기의 3 dB 신호분배를 제외하면 1.5 dB보다 작은 것을 확인할 수 있고, 그림 5(b)를 통해 격리특성은 대역 내에서는 20 dB보다 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 경로간 크기 및 위상 불균형을 시뮬레이션과 측정결과로 나타냈다. 대역 내 진폭 불균형은 ± 0.2 dB 이하이고, 위상은 $180^\circ \pm 3.2^\circ$ 의 불균형을 갖는다. 그림 7은 제작된 광대역 임의의 위상차를 갖는 대역통과 결합 선로 전력분배기를 보이고 있다. 회로의 전체 크기는 $88.54 \text{ mm} \times 43.6 \text{ mm}$ 이다.

IV. 결 론

이 논문은 광대역에 걸쳐 임의의 위상차를 갖는 대역

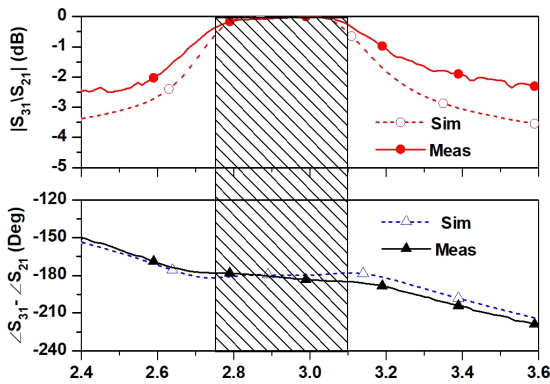


그림 6. 크기와 위상 불균형 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 6. Simulation and measurement results of magnitude and phase imbalances.

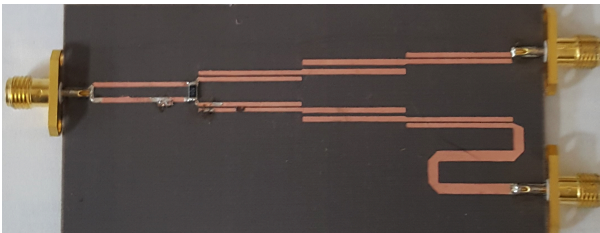


그림 7. 제작된 광대역 임의의 위상차를 갖는 대역통과 결합 선로 전력분배기
Fig. 7. Photograph of fabricated bandpass filtering coupled line power divider with broadband arbitrary phase difference.

통과 결합 선로 전력분배기를 보여주고 있다. 제안된 전력분배기는 기존 회로와 비교하여 매우 작은 위상 불균형을 제공한다. 회로의 설계 방정식을 통해 결합 선로 대역통과 전력분배기의 상대주파수 대역폭을 조절하여 광대역에서의 일정한 위상 차이를 구현할 수 있다. 2.90 GHz의 중심주파수에서 180° 의 위상 차이를 갖는 회로 제작을 통해 타당성을 입증하였다. 제안된 전력분배기는 적은 크기와 위상 불균형과 주파수 선택성의 특성을 갖고 있어 무선통신시스템, 안테나 배열 시스템 등 다양한 응용이 가능하다는 잠재력을 갖고 있다.

References

- [1] X. Y. Zhang, K. X. Wang, and B. J. Hu, "Compact filtering power divider with enhanced second-harmonic suppression," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 23, no. 9, pp. 483-485, Sep. 2013.
- [2] C. F. Chen, C. Y. Lin, "Compact microstrip filtering power dividers with good in-band isolation performance," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 24, no. 1, pp. 17-19, Jan. 2014.
- [3] S. F. Chao, W. C. Lin, "Filtering power divider with good isolation performance," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 11, pp. 815-817, May 2014.
- [4] S. Chen, Y. Yu, and M. Tang, "Planar out-of-phase Gysel power divider with high power splitting ratio," *Electronics Letters*, vol. 51, no. 24, pp. 2010-2012, Nov. 2015.
- [5] H. Zhu, Z. Cheng, and Y. J. Guo, "Design of wideband in-phase and out-of-phase power dividers using microstrip-to-slotline transitions and slotline resonators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 4, pp. 1412-1424, Apr. 2019.
- [6] H. R. Ahn, "Compact CVT-/CCT-unequal power dividers for high-power division ratios and design methods for arbitrary phase differences," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 12, pp. 2954-2964, Dec. 2014.

- [7] Y. Jang, D. Ahn, "Wideband 90° phase shifter using modified composite resonant circuits for phase slope alignment," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, no. 4, pp. 1498-1502, Dec. 2019.
- [8] Y. P. Lyu, L. Zhu, and C. H. Cheng, "A new design of filtering power dividers with arbitrary constant phase difference, impedance transformation, and good isolation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 169495-169507, Nov. 2019.
- [9] Y. P. Lyu, L. Zhu, and C. H. Cheng, "Proposal and synthesis design of differential phase shifters with filtering function," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 8, pp. 2906-2917, Aug. 2017.
- [10] P. Kim, G. Chaudhary, and Y. Jeong, "Unequal termination impedance parallel-coupled lines band-pass filter with arbitrary image impedance," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 32, no. 8, pp. 984-996, Dec. 2018.

김 수 연 [전북대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-8579-6586>



2020년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학사)
 2020년 3월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 석사과정
 [주 관심분야] RF 수동 회로 설계

정 용 채 [전북대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-8778-5776>



1989년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 1991년 2월~1998년 2월: 삼성전자 정보통신본부 선임연구원
 2006년 7월~2007년 12월: 미국 Georgia Institute of Technology 방문연구교수
 1998년 3월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 교수
 [주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 해석 및 설계

Girdhari Chaudhary [전북대학교/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2060-9860>



2004년 8월: B.E. in Electronics & Communication Engineering, NEC, Nepal
 2007년 7월: M. Tech. In Electronics & Communication Engineering, MN-IT, Jaipur, India
 2015년 2월: 전북대학교 전자정보공학부 (공학박사)
 2015년 3월~2016년 10월: 전북대학교 BK21 PLUS HOPE-IT인력양성사업단 박사후연구원
 2016년 10월~현재: IT융합연구센터 연구교수
 [주 관심분야] Multi-Band Tunable 수동회로, Negative 군지연회로 및 응용 등