THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2025 July; 36(7), 648～655.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2025.36.7.648
ISSN 1226-3133 (Print)・ISSN 2288-226X (Online)

시공간 변조를 이용한 가역 및 비가역 응답 특성의 대역통과 전력 분배기 설계

Design of a Filtering Power Divider With Reciprocal and Non-Reciprocal Responses Using Spatiotemporal Modulation

차우다리 기르다리*・정 용 채*,**

Girdhari Chaudhary*・Yongchae Jeong*,**

요 약

본 논문에서는 여파기, 전력 분배기 및 아이솔레이터의 기능을 단일 회로 내에 통합한 다기능 대역통과 전력 분배기(FPD, filtering power divider) 설계를 제시한다. 제안된 FPD는 단자 2와 1 사이에 가역 대역통과 전력 전달 특성 ($|S_{21}| = |S_{12}|$)을 제공하는 반면, 단자 3과 1 사이에는 대역통과 비가역 아이솔레이터 전력 전달 특성 ($|S_{31}| \neq |S_{13}|$)을 제공한다. 단자 3과 1 사이의 아이솔레이터 기능은 점진적 위상 편이를 갖는 정현파 변조 신호로 공진기들을 변조하여 구현된다. 반면, 공진기에 점진적 위상 변조 신호가 없는 단자 2와 1 사이에는 가역 전력 전달 특성이 구현된다. 실험적 검증을 위해 동일한 전력 분배 비율을 갖는 마이크로스트립 라인 FPD를 설계하고 제작하였다. 실험 결과, 순방향 전송 삽입 손실($|S_{21}| = |S_{12}|$ 및 $|S_{31}|$)은 4.95 dB인 반면 역방향 분리($|S_{13}|$)는 25 dB보다 크다. 입력 및 출력 단자 임피던스 정합은 12 dB보다 우수하다.

Abstract

This paper presents the design of a multifunctional filtering power divider (FPD) that integrates the functions of a filter, power divider, and isolator within a single circuit. The proposed FPD provides a reciprocal filtering power response (i.e. $|S_{21}| = |S_{12}|$) between ports 2 and 1 while offering filtering isolator functionality (i.e. $|S_{31}| \neq |S_{13}|$) between ports 3 and 1. The isolator functionality between ports 3 and 1 was achieved by modulating the resonators with a progressive phase-shift sinusoidal modulation signal. In contrast, a reciprocal response was achieved between ports 2 and 1 owing to the absence of a progressive phase modulation signal to the resonators. For the experimental validation, a microstrip-line FPD with an equal power-division ratio was designed and fabricated. Experiment results showed that the forward transmission insertion loss (i.e. $|S_{21}| = |S_{12}|$ and $|S_{31}|$) was 4.95 dB, whereas the reverse isolation ($|S_{13}|$) exceeded 25 dB. The impedance matching of the input and output ports exceeded 12 dB.

Key words: Filtering Power Divider, Isolator, Non-Reciprocal Response, Spatio-Temporal Modulation, Time-Modulated Resonators

「이 연구는 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00209081, 40%), (No. RS-2019-NR040079, 40%), (IITP-2024-RS-2024-00439292, 20%).」

*전북대학교 전북RICE지능화혁신연구센터(Jeonbuk RICE Intelligence Innovation Research Center, Jeonbuk National University)
**전북대학교 전자공학부(Division of Electronic Engineering, Jeonbuk National University)

・Manuscript received March 11, 2025 ; Revised April 6, 2025 ; Accepted May 1, 2025. (ID No. 20250311-026)

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

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서 론

다중 표준 및 동작 모드를 지원하면서도 더 작은 회로 면적을 유지할 수 있는 차세대 무선 전단부(RFFE, RF front-end)에 대한 다기능 회로 수요가 높다. 대역 통과 여파기, 전력 분배기, 아이솔레이터와 같은 여러 회로의 기능을 단일 회로로 통합하는 것은 현대 무선 통신 시스템 RFFE의 소형화 및 성능 향상을 달성하기 위한 좋은 예 중 하나이다[1],[2].

지난 20년 동안 단일 대역 및 다중 대역 주파수에서 동작 가능한 여러 대역통과 전력 분배기(FPD, filtering power divider)가 연구되었다[3]~[6]. 또한 주파수 조정 가능한 여파기 섹션을 내장한 가변 단일 및 이중 대역 대역통과 전력 분배기와 같은 다기능 전력 분배기도 시연되었다[7]~[10]. 그러나 이러한 기존 FPD는 로렌츠 상호 정리에 의해 본질적으로 가역적(reciprocal) 특성을 가진다. 그럼에도 불구하고 이전에 보고된 이러한 FPD 중 어느 것도 비가역(non-reciprocal) 기능과 가역 기능을 단일 회로로 결합하지 않았다. FPD의 비가역 특성을 안테나와 통합하면 동일한 작동 주파수에서 위상 배열 안테나의 송수신 기능을 독립적으로 제어할 수 있어 레이더, 감지 및 대역 내 전이중(full duplexing) 통신 시스템의 새로운 기능 가미와 응용이 가능하게 된다.

본 논문은 시공간 변조(STM, statio-temporal modulation) 기술을 사용하여 페라이트(ferrite)와 같은 자성체 회로를 사용하지 않고도 가역 및 비가역 주파수 응답을 갖는 다기능 FPD를 제안한다. FPD는 단자 2와 1 사이에 상호 대역통과 가역 전력 전달 특성 ($|S_{21}| = |S_{12}|$)을 제공하는 반면, 단자 3과 1 사이에는 순방향 대역통과 전력 분배기 응답과 역방향 아이솔레이터 기능 ($|S_{31}| \neq |S_{13}|$)을 제공한다.

Ⅱ. 회로 해석 이론

그림 1은 제안된 다기능 FPD의 결합 다이어그램을 나타낸다. 그림에서 보듯이, 제안된 FPD는 입력 단자(S)와 부하(출력) 단자를 나타내는 두 개의 출력 단자(L_1, L_2), 비공진(non-resonating) 노드(N_1, N_5) 시간 변조 공진기

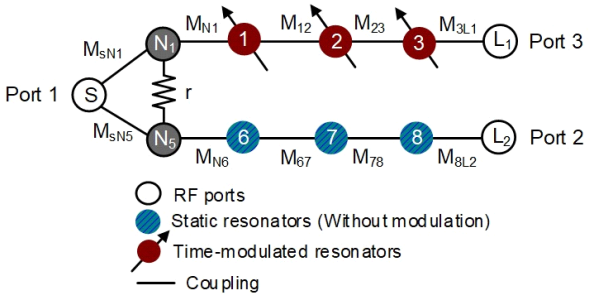


그림 1. 제안된 다기능 대역통과 전력 분배기의 결합 다이어그램

Fig. 1. Coupling diagram of proposed multi-functional filtering power divider.

(TMR 1, 2, 3, time-modulated resonator)와 정적(static) 공진기(6, 7, 8)로 구성된다. 단자 3과 1 사이의 비가역성을 달성하기 위해 식 (1)에 정의한 것과 같은 시간 가변 커패시터를 갖는 공진기가 사용된다.

$$C_i(t) = C_0\{1 + m\cos[2\pi f_m t + (i-1)\Delta\phi]\} \ (i = 1,2,3) \tag{1}$$

여기서 C_0, m , f_m 및 $\Delta\phi$ 은 공정 정전 용량, 진폭 변조 계수, 변조 주파수, 위상을 각각 나타낸다[11],[12].

시간 변조 공진기(TMR)는 시간에 따라 변하는 커패시터로 구성되므로 각 공진기는 RF 신호 주파수 ω 항뿐만 아니라 변조 주파수와 RF 주파수가 혼합된 여러 개의 혼변조 (IM, intermodulation) 주파수 ($2\pi\{f \pm k_i f_m\}$, k_i = −2, −1, 0, 1, 2) 성분들을 포함한다. k_i 값에 따른 IM 성분들을 주파수 영역에서 고려하면, TMR의 스펙트럼 어드미턴스 행렬은 식 (2)~식 (5)처럼 도출할 수 있다.

$$\lambda_i = \begin{pmatrix} A^{+2} & B^{+2} & 0 & 0 & 0 \\ D^{+1} & A^{+1} & B^{+1} & 0 & 0 \\ 0 & D^0 & A^0 & B^0 & 0 \\ 0 & 0 & D^{-1} & A^{-1} & B^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & D^{-2} & A^{-2} \end{pmatrix}, i = 1,2,3 \tag{2}$$

$$A^k = \frac{x^k}{2\pi^2 f_0^2} - \frac{1}{x^k C_0}, B^k = \frac{x^k m C_0}{2} e^{-j(i-1)\Delta\phi} \tag{3}$$

$$D^k = \frac{x^k m C_0}{2} e^{j(i-1)\Delta\phi}, i = 1,2,3 \tag{4}$$

$$x^k = 2\pi(f + kf_m),\ k = -2, -1, 0, 1, 2 \tag{5}$$

여기서, f는 FPD의 중심 주파수이다.

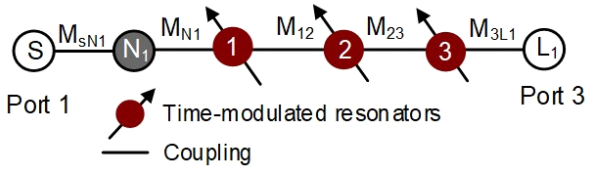
단자 1에서 출력 단자 2와 3으로의 신호 전송은 우(even) 모드 동작 하에서만 발생하므로, 전송 S-파라미터는 우 모드 등가 회로에서 찾을 수 있다. 그림 2는 우 모드 동작 조건에서 제안된 다기능 FPD의 등가 결합 다이어그램을 나타낸다. 그림 2(a)에 나타난 결합 다이어그램을 사용하면, 단자 3과 1 사이의 순방향 및 역방향 전송 S-파라미터는 식 (6)~식 (13) 과 같이 구해진다.

$$S_{31} = \frac{2Z_0}{Z_0E_1 + E_2 + 2Z_0^2E_3 + 2Z_0E_4} \tag{6}$$

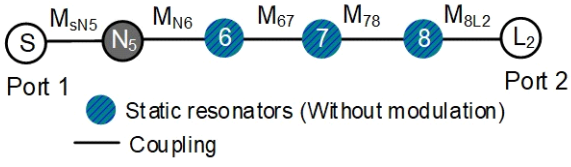
$$S_{13} = \frac{2Z_0}{Z_0E_1 + E_5 + 2Z_0^2E_6 + 2Z_0E_7} \tag{7}$$

$$E_1 = \frac{M_{N1}M_{3L1}\lambda_2}{M_{sN1}M_{12}M_{23}} \tag{8}$$

$$E_2 = \frac{M_{N1}M_{23}^2U + M_{N1}\lambda_2\lambda_3}{M_{sN1}M_{12}M_{23}M_{3L1}} \tag{9}$$



(a) 단자 2와 1
(a) Ports 2 and 1



(b) 단자 3과 1
(b) Ports 3 and 1

그림 2. 제안된 FPD의 우 모드결합 다이어그램
Fig. 2. Coupling diagram of proposed FPD under even-mode excitation between.

$$E_3 = \frac{M_{sN1}M_{3L1}\left(M_{12}^2U + \lambda_1\lambda_2\right)}{M_{N1}M_{12}M_{23}} \tag{10}$$

$$E_4 = \frac{M_{sN1}\left(M_{23}^2\lambda_1 + M_{12}^2\lambda_1 + \lambda_1\lambda_2\lambda_3\right)}{M_{N1}M_{12}M_{23}M_{3L1}} \tag{11}$$

$$E_5 = \frac{M_{N1}M_{23}^2U + M_{N1}\lambda_3\lambda_2}{M_{sN1}M_{12}M_{23}M_{3L1}} \tag{12}$$

$$E_6 = \frac{M_{sN1}M_{3L1}\left(M_{12}^2U + \lambda_2\lambda_1\right)}{M_{N1}M_{12}M_{23}} \tag{13}$$

$$E_7 = \frac{M_{sN1}\left(M_{23}^2\lambda_1 + M_{12}^2\lambda_1 + \lambda_3\lambda_2\lambda_1\right)}{M_{N1}M_{12}M_{23}M_{3L1}} \tag{14}$$

여기서 U는 단위 행렬이다.

마찬가지로 단자 2와 1 사이의 순방향 및 역방향 전송 S-파라미터는 그림 2(b)를 사용하여 식 (15)~식 (18)과 같이 구해진다.

$$S_{21} = S_{12} = \frac{2Z_0M_{sN2}M_{N6}M_{67}M_{78}M_{8L2}}{\left\{\begin{array}{l} E_8 + 2\pi\left(\dfrac{f}{2\pi^2f_0^2} - \dfrac{1}{fC_0}\right)E_9 \\ +4\pi^2\left(\dfrac{f}{2\pi^2f_0^2} - \dfrac{1}{fC_0}\right)^2E_{10} \\ +16\pi^3Z_0\left(\dfrac{f}{2\pi^2f_0^2} - \dfrac{1}{fC_0}\right)^3M_{sN5}^2 \end{array}\right\}} \tag{15}$$

$$E_8 = M_{N6}^2M_{78}^2 + 2Z_0^2M_{sN5}^2M_{12}^2M_{8L2}^2 \tag{16}$$

$$E_9 = Z_0\left(M_{N6}^2M_{8L2}^2 + 2M_{sN5}^2M_{78}^2 + 2M_{sN5}^2M_{67}^2\right) \tag{17}$$

$$E_{10} = M_{N6}^2 + 2Z_0^2M_{sN5}^2M_{8L2}^2 \tag{18}$$

동일한 전력 분배 비율과 완벽한 입출력 정합을 달성하기 위한 결합 값은 다음과 같이 결정된다.

$$M_{sN1} = M_{sN5} = \sqrt{\frac{1}{2Z_0^2}} \tag{19}$$

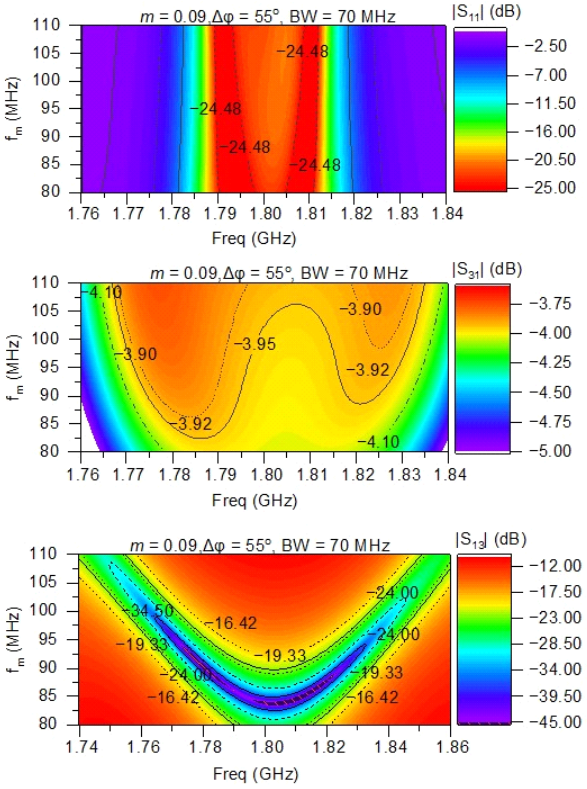


그림 3. 변조 주파수 (f_m)에 따른 단자 3과 1 사이의 S-파라미터. 저역 통과 프로토타입 값: g_0=1, g_1=g_3=0.6292, g_2=0.9703, g_4=1

Fig. 3. S-parameters between ports 3 and 1 according to modulation frequency (f_m). Low-pass prototype values: g_0=1, g_1=g_3=0.6292, g_2=0.9703, g_4=1.

$$M_{N1} = M_{N6} = \sqrt{\frac{4\pi C_0 BW}{g_0 g_1 r}} \tag{20}$$

$$M_{12} = M_{67} = \frac{2\pi C_0 BW}{\sqrt{g_1 g_2}} \tag{21}$$

$$M_{23} = M_{78} = \frac{2\pi C_0 BW}{\sqrt{g_2 g_3}} \tag{22}$$

$$M_{3L1} = M_{8L2} = \sqrt{\frac{2\pi C_0 BW}{g_3 g_4 Z_0}} \tag{23}$$

여기서 g_0, g_1, g_2, g_4는 3차 여파기의 저역 통과 프로토타입 값이며, BW는 정적 상태에서의 FPD의 대역폭이다.

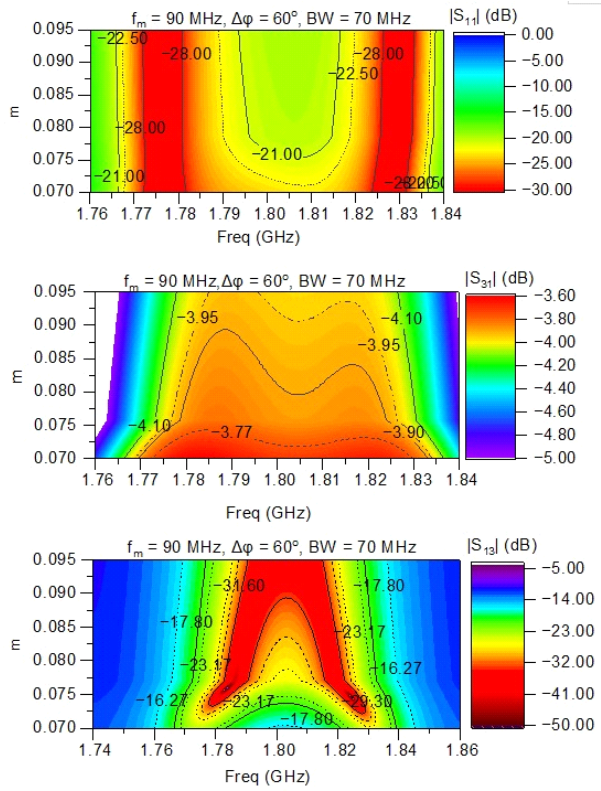


그림 4. 변조 지수 (m)에 따른 단자 3과 1 사이의 S-파라미터. 저역 통과 프로토타입 값: g_0=1, g_1=g_3=0.6292, g_2=0.9703, g_4=1

Fig. 4. S-parameters between ports 3 and 1 according to modulation indes (m). g_0=1, g_1=g_3=0.6292, g_2=0.9703, g_4=1.

매개변수 연구를 통해 제안된 FPD가 양호한 입력 단자 정합, 순방향의 낮은 삽입 손실(IL, insertion loss) 및 역방향 전송의 높은 격리도(isolation)를 달성할 수 있는 최적의 변조 매개변수 값들을 결정하였다. 그림 3 및 그림 4는 단자 3과 1 사이의 제안된 다기능 FPD의 계산된 S-파라미터를 보여준다. 큰 f_m 값은 작은 IL을 갖게 하면서 역방향 분리가 감소하며, 지나치게 작은 f_m 값은 더 큰 IL과 더 낮은 역방향 분리도 초래한다. f_m이 고정된 경우에는 m 값이 높을수록 IL과 역방향 분리가 증가하지만, m 값이 작을수록 IL과 역방향 분리가 낮아진다. 또한, 지나치게 높은 m 값은 높은 IL과 낮은 역방향 분리를 모두 초래한다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안된 FPD는 단자 3과 1 사이에 비가역 특성을 제공하지만, 삽입 손실, 역방향 분

리 및 단자 정합 간의 균형을 타협(trade-off)해야 한다.

그림 5는 1.80 GHz의 중심 주파수에서 제안된 다기능 FPD의 시뮬레이션 주파수 응답 특성을 보인다. 이러한 결과는 제안된 FPD가 단자 3과 1 사이에 아이솔레이터 기능(비가역 응답)을 나타내고 단자 2와 1 사이에 가역 응답을 나타냄을 보인다. 그러면서 입력 및 출력 단자 정합이 양호하고, 중심 주파수에서 20 dB 이상의 역방향 격리 특성을 제공한다.

그림 6은 RF 주파수(f_0)가 1.8 GHz일 때 0 dBm의 입력 전력 신호가 단자 1에 입력될 때, 그리고 반대로 단자 3에 신호가 인가되었을 때에 제안된 FPD의 출력 스펙트럼을 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 단자 3의 출력 스펙트럼은 시간 변조 공진기에 의해 RF 기본 주파수(f_0)와 IM 곱 주파수($f_{RF} \pm nf_m$, n = 1, 2, 3, ⋯)에서 생성되지만, 단자 2의 출력 스펙트럼은 시간 변조 공진기가 없기 때문에 주파수 f_0인 신호만 생성된다.

Ⅲ. 실험 결과

실험적 검증을 위해, 유전율이 2.20이고 두께가 31 mil인 Taconic사의 테프론 기판을 사용하여 중심 주파수가

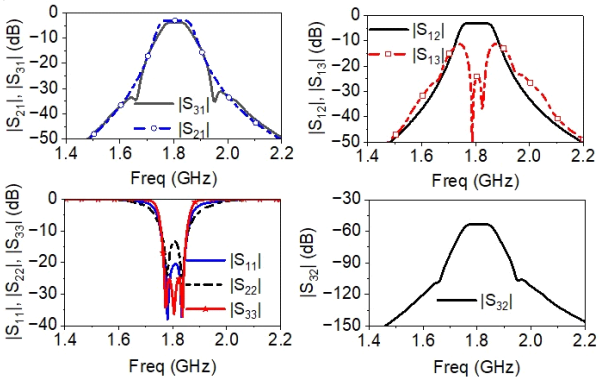


그림 5. 제안된 다기능 대역통과 전력 분배기의 시뮬레이션 *S*-파라미터 특성. 저역 통과 프로토타입 값: g_0=1, g_1=g_3=0.6292, g_2=0.9703, g_4=1, BW=70 MHz. 변조 매개변수: f_m=90 MHz, m=0.09, $\Delta\phi$ =60°

Fig. 5. Simulated *S*-parameters of proposed multi- functional filtering power divider. Low-pass prototype values: g_0=1, g_1=g_3=0.6292, g_2=0.9703, g_4=1, BW=70 MHz. Modulation parameters: f_m=90 MHz, m=0.09, $\Delta\phi$ =60°.

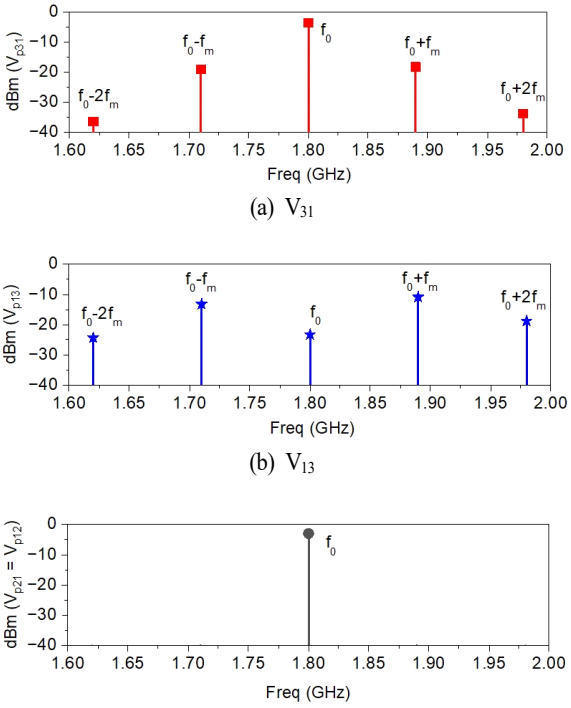


그림 6. 제안된 FPD의 시뮬레이션 출력 스펙트럼(@ P_{in}=0 dBm, f_0=1.80 GHz, f_m=90 MHz, m=0.09, $\Delta\phi$ = 60°)

Fig. 6. Simulated output spectra of proposed FPD (@ P_{in}=0 dBm, f_0=1.80 GHz, f_m=90 MHz, m=0.09, $\Delta\phi$=60°).

1.80 GHz인 동일 전력 분배 마이크로스트립 라인 다기능 FPD를 설계하고 제작하였다. 실험에 사용된 시간 가변 커패시터($C_i(t)$)는 Skyworks사의 변조 바랙터 다이오드 SMV 1233-079LF를 사용하여 구현하였다.

그림 7은 제작된 회로의 사진을 보여준다. 이 작업에서 TMR은 바랙터 다이오드로 종단된 전송선로를 사용하여 구현하였고, 비공진 공진기(NRN, non-resonating resonator)는 중심 주파수에서 1/4파장 전송선로로 구현하였다. 결합 NRN과 첫 번째 TMR은 직렬 전송선로와 결합선로를 통해 구현하였다. 마찬가지로 결합 TMR 1과 2는 단락 회로 스터브를 사용하여 구현하는 반면, 결합 TMR 2와 3은 결합선로를 사용하여 구현하였다. 전체 회로의 물리적 치수는 ANSYS HFSS와 고조파 균형(HB, harmonic balance) 기능을 이용한 ADS의 공동 시뮬레이션을 사용하여 최적화하였다. 아울러 변조 정현파의 정보를 함께 나

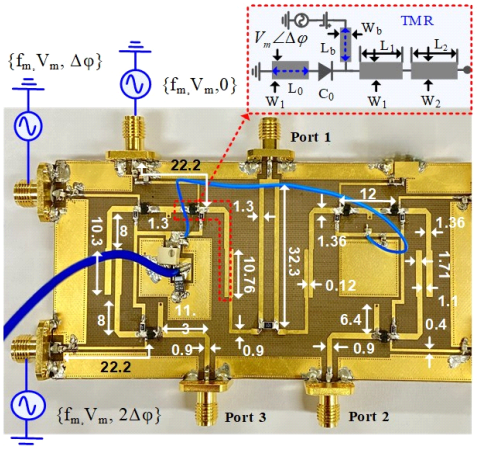


그림 7. 제작된 회로 사진 및 시험 set-up(변조 매개변수: f_m=85 MHz, V_m=2.4 V, Δφ=60°)

Fig. 7. Photograph of fabricated circuit and its test set-up (modulation parameters: f_m=85 MHz, V_m=2.4 V, Δφ=60°).

타냈으며, 정현파의 점진적 위상 변화가 있음도 나타낸다.

그림 8은 제안된 다기능 FPD의 측정된 *S*-파라미터 결과를 보여준다. 측정 결과는 V_{dc} = 3.5 V, f_m = 85 MHz, V_m = 2.4 V 및 $\Delta\phi = 60^{o}$를 적용하여 추출되었다. 측정 결과는 단자 2와 1 사이에 가역 응답 특성을 제공하는 반면 단자 3과 1 사이에는 비가역 응답 특성을 보인다. 단자 2와 1 사이의 측정된 순방향 전송 IL은 1.78 GHz의 중심 주파수에서 $|S_{21}|$ = 7.11 dB이지만, 단자 3과 1 사이의 순방향 IL은 1.78 GHz에서 $|S_{31}|$ = 7.31 dB이다. 순방향 전송은 주로 바랙터 다이오드의 기생 저항으로 인한 것이다. 마찬가지로, 단자 3과 1 사이의 측정된 역방향 격리 특성은 중심 주파수에서($|S_{13}|$) 20 dB보다 크다. 입력 및 출력 단자 임피던스 정합은 15 dB 이상이다. 출력 단자 3과 2 사이의 격리도는 전체 측정 주파수에서 30 dB 이상을 얻었다.

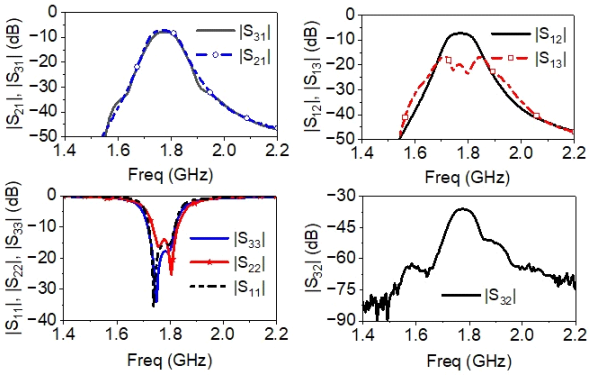


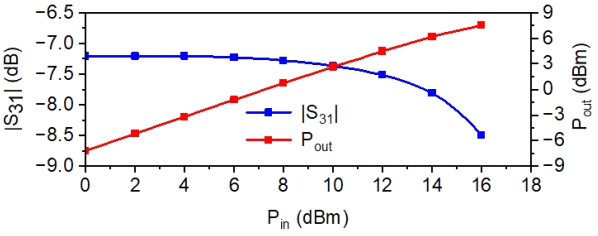
그림 8. 제작된 회로의 *S*-파라미터 측정 결과

Fig. 8. Measured *S*-parameter results of fabricated circuit.

그림 9는 제안된 FPD의 시뮬레이션된 전력 처리 성능과 기본파 및 3차 혼변조 신호의 입력 교차점(IIP3)를 나타낸다. IIP3 시뮬레이션은 중심 주파수 1.80 GHz에 1 MHz 주파수 간격의 두 입력 신호로 수행되었다. 이 결과에서 볼 수 있듯이, 시뮬레이션된 IIP3는 19.4 dBm이다. 제안된 FPD의 전력 처리 성능과 비선형성은 주로 바랙터 다이오드의 비선형성에 의해 제한된다.

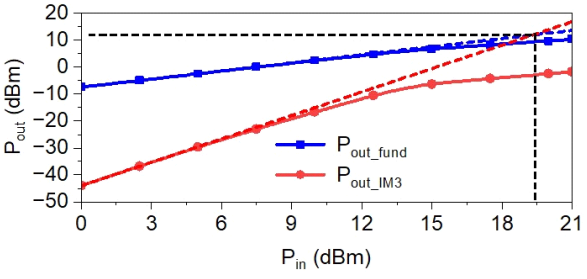
Ⅳ. 결 론

본 논문은 대역통과 여파기, 전력 분배기, 아이솔레이터의 기능을 단일 회로로 통합한 다기능 대역통과 전력 분배기의 통합 설계 방법을 제시하였다. 분석적 설계 방



(a) 전력 처리

(a) Power handling



(b) IIP3

(b) IIP3

그림 9. 제안된 FPD의 전력 처리 및 IIP3 시뮬레이션 결과

Fig. 9. Simulated power handling and IIP3 results of proposed FPD.

정식을 이용하여 통합 설계가 가능하였으며, 마이크로스트립 라인 다기능 대역통과 전력 분배기를 제작하여 검증하였다. 측정 결과에 따르면 제안된 회로는 단자 2와 1 사이에서 상호 대역통과 전력 분배기 응답을 얻지만, 단자 3과 1 사이에서는 비가역 대역통과 전력 분배기 응답을 달성하였다. 이 방법을 이용하면 두 출력 단자에 모두 비가역 대역통과 전력 분배기 설계도 가능하다. 제안된 다기능 전력 분배기는 동일한 동작 주파수에서 위상 배열 안테나의 송수신 특성을 독립적으로 제어하는 데 사용할 수 있을 것으로 예상한다.

References

[1] G. Chaudhary, Y. Jeong, "Unequal power division ratio nonreciprocal filtering power divider with arbitrary termination impedance and center frequency tunability," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 72, no. 1, pp. 242-251, Jan. 2024.

[2] G. Chaudhary, Y. Jeong, "Dual-band filtering power divider with tunable first passband frequency and isolator functionality," *IEEE Access,* vol. 12, pp. 153295-153306, Oct. 2024.

[3] 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.

[4] K. X. Wang, X. Y. Zhang, and B. J. Hu, "Gysel power divider with arbitrary power ratios and filtering responses using coupling structure," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 3, pp. 431-440, Mar. 2014.

[5] L. Gao, X. Y. Zhang, and Q. Xue, "Compact tunable filtering power divider with constant absolute bandwidth," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 10, pp. 3505-3513, Oct. 2015.

[6] D. Lu, M. Yu, N. S. Barker, M. Li, and S. W. Tang, "A simple and general method for filtering power divider with frequency-fixed and frequency-tunable fully canonical filtering-response demonstrations," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 5, pp. 1812-1825, May 2019.

[7] G. Zhang, S. Liu, W. Chen, Z. Zhang, and J. Yang, "Design method for compact multifunctional reconfigurable filtering power divider on a new tunable three-port multi-mode topology," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers,* vol. 67, no. 12, pp. 4580-4592, Dec. 2020.

[8] B. Lee, B. Koh, S. Nam, T. H. Lee, and J. Lee, "Frequency-tunable filtering power divider with new topology," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 7, no. 7, pp. 1151-1162, Jul. 2017.

[9] R. Gómez-García, R. Loeches-Sánchez, D. Psychogiou, and D. Peroulis, "Single/multi-band Wilkinson-type power dividers with embedded transversal filtering sections and application to channelized filters," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers,* vol. 62, no. 6, pp. 1518-1527, Jun. 2015.

[10] D. Psychogiou, R. Gómez-García, A. C. Guyette, and D. Peroulis, "Reconfigurable single/multi-band filtering power divider based on quasi-bandpass sections," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 9, pp. 684-686, Sep. 2016.

[11] G. Chaudhary, Y. Jeong, "Frequency tunable impedance matching nonreciprocal bandpass filter using time-modulated quarter-wave resonators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 69, no. 8, pp. 8356-8365, Aug. 2022.

[12] G. Chaudhary, Y. Jeong, "Nonreciprocal bandpass filter using mixed static and time-modulated resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 4, pp. 297-300, Apr. 2022.

Girdhari Chaudhary [전북RICE지능화혁신연구센터/연구 부교수]

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, MNIT, Jaipur, India

2013년 2월: 전북대학교 전자정보공학부 (공학박사)

2013년 3월～2016년 10월: 전북대학교 BK21 PLUS HOPE-IT 인력양성사업단 계약교수

2016년 10월～2021년 2월: IT융합연구센터 연구 조교수

2021년 3월～2024년 8월: JIANT-IT 융합연구센터 계약 교수

2024년 9월～현재: 전북RICE지능화혁신연구센터 연구 부교수

[주 관심분야] Multi-Band Tunable 수동회로, Negative 군지연회로 및 응용 등

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