
메타물질 구조 다중대역 6단자 위상상관기 설계 및 제작

김영완*

Design and fabrication of multi-band six-port phase correlator using metamaterial

Young-Wan Kim*

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 2009-0071956)

요 약

본 논문에서는 메타물질 구조 다중대역 6단자 위상상관기를 설계하고 제작하였다. 이중 주파수 대역에서 신호를 수신 처리할 수 있는 집중소자형 메타물질 구조를 해석하고, 해석된 결과를 기반으로 다중대역 직접변환 수신 전처리기에 적합한 소형화 메타물질 구조 6단자 위상상관기를 제안하고 구현하였다. 다중대역 6단자 위상상관기를 구성하는 저항성 전력 분배기와 메타물질 90° 하이브리드 결합기의 산란 계수를 기반으로 동일한 특성을 갖는 6단자 위상상관기 구성 요소를 제작하고 측정하였다. 측정된 메타물질 구조 6단자 위상상관기는 모의실험 결과와 일치하였으며, 이중 주파수 대역에서 -20 dB 이하의 정합과 1 dB 이내의 전달 이득차, 그리고 $\pm 4.1^\circ$ 이하의 전달 위상차 특성으로 양호한 다중대역 6단자 위상상관기 성능을 나타내었다.

ABSTRACT

The multi-band six-port phase correlator using metamaterial was designed and fabricated in this paper. The lumped metamaterial structure that can process the dual-band receiving signal was analyzed. Based on the analyzed results, the small-sized metamaterial six-port phase correlator for multi-band direct conversion method was proposed and fabricated. Also, the resistive power divider and 90° hybrid coupler that comprises the six-port phase correlator were implemented based on the scattering parameters of metamaterial six-port phase correlator. The measured results of the proposed six-port phase correlator show the good agreement with simulation results. The performance of the six-port phase correlator shows the reflection loss below -20 dB in the dual-band. Also, the proposed six-port phase correlator got a good transmission characteristic within 1 dB gain difference and $\pm 4.1^\circ$ phase imbalance, respectively.

키워드

다중대역 6단자 위상상관기, 메타물질 구조 직접변환, 메타물질 구조 6단자 소자

Key word

Multi-band six-port phase correlator, Metamaterial direct conversion, Metamaterial six-port element

* 군산대학교(ywkim@kunsan.ac.kr)

접수일자 : 2010. 03. 11

심사완료일자 : 2010. 04. 01

I. 서 론

6단자 위상상관기는 6단자 직접변환 방식의 전처리 기로 사용된다. 일반적으로 6단자 위상상관기는 분포 정수 선로를 사용한 MHMIC 기본 구조로 구현되며, 사용주파수에 의해 제한되는 회로 크기를 줄이기 위하여 MHMIC 구조를 MMIC 설계 단계에서 회로 크기가 다소 해결되는 MMIC layout 소형화 설계 기술을 적용한다[1]. 아울러 평면형 구조를 30% 이상 소형화할 수 있는 3차원 구조의 적층형 6단자 구조로 구현되고 있다[2].

비교적 낮은 주파수 대역에서는 I/Q 채널 경로의 소자를 동일하게 구현할 수 있는 반도체 칩 구현 기술로 능동형 직접변환 방식을 보다 많은 영역에서 사용하고 있으며, 능동형 직접변환 기술에 비해 더 robust한 특성을 갖는 6단자 직접변환 방식을 적용한 수신 구조는 집중회로를 사용하여 고정된 주파수 대역을 가지나 단일 IC 형태로 구현되고 있다[3]. 그러나 기존 기술과 능동형 또는 6단자 직접변환 방식에서 나타나는 고정 회로에 의한 사용 주파수의 제한, 즉 단일대역 사용과 제한된 크기로 인하여 실질적으로 다중대역 SDR 기반 다중 데이터 처리 및 소형화 구현 문제가 발생하며, 실장 및 응용성면에서 실용화 문제가 발생한다. 따라서 다중대역 SDR 기반 6단자 직접변환 방식의 전처리 기술로 사용되기 위해서는 소형화 구조와 다중대역을 처리할 수 있는 6단자 위상상관기의 구조 개선이 요구된다.

본 논문에서는 단일대역 6단자 위상상관기의 주파수 특성을 개선하여 2개 이상의 주파수를 처리할 수 있는 다중대역 6단자 구조와 낮은 주파수에서 소형화 구현을 위한 집중소자형 메타물질 구조 6단자 위상상관기를 설계하고 제작한다. 메타물질을 사용한 6단자 위상상관기와 위상상관기 구성 요소의 산란 계수를 유도하여 해석하고, 이를 바탕으로 다중대역 6단자 위상상관기 구조를 제안한다. 다중대역 6단자 위상상관기는 2개 이상의 주파수 신호를 전력 분배하는 저항형 전력 분배기와 전력 분배된 신호를 90° 위상 결합하는 메타물질 구조 전력 결합기로 구성되며, 낮은 주파수 대역에서 소형화를 위한 집중소자형 메타물질 구조를 갖는다.

II. 메타물질 구조 6단자 위상상관기

2.1 직접변환 6단자 위상상관기

직접변환 6단자 위상상관기는 그림 1과 같이 하나의 동위상 전력 분배기와 세 개의 90° 하이브리드 결합기(coupler)로 구성된다.

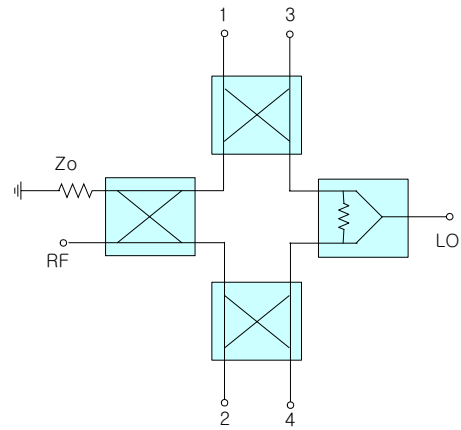


그림 1. 6단자 위상상관기 구성도.
Fig. 1. Block diagram of six-port phase correlator.

여기서, 동위상 전력 분배기와 90° 하이브리드 결합기의 산란 계수([S]_p, [S]_h)는 다음 식(1)과 같다[4].

$$[S]_p = -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j & j \\ j & 0 & 0 \\ j & 0 & 0 \end{bmatrix}, [S]_h = -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

동위상 전력 결합기와 90° 하이브리드 결합기로 구성되는 그림 1의 6단자 위상상관기의 산란 계수([S]_{six})는 식 (1)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[S]_{six} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & +j & +j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & +j & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +j \\ +j & +j & -1 & -1 & 0 & 0 \\ +j & -1 & +1 & +j & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 6단자 위상상관기의 단자 5에 국부발진 신호 (LO)를 입력하고, 단자 6에 수신 RF 신호(RF)를 입력할 경우, 단자 5와 단자 6에서 입력된 신호는 식 (2)의 6단자 산란 계수와 같이 네 개의 출력 단자에서 서로 다른 위상과 진폭이 결합되어 나타난다.

단자 5 입력 신호에 대해 단자 1 출력 신호와 단자 2 출력 신호는 동일한 90° 위상값을 갖는다. 그리고, 단자 3 출력 신호와 단자 4 출력 신호는 동일한 -180° 위상값을 가지며, 단자 1 출력 신호와 단자 3 출력 신호와는 90° 위상차를 갖는다.

또한, 단자 6 입력 신호에 대해 단자 1 출력 신호와 단자 4 출력 신호는 동일한 90° 위상값을 가지며, 단자 2 출력 신호는 -180° 위상값을 그리고 단자 3 출력 신호는 0° 위상값을 갖는다. 즉, 단자 1 출력 신호와 단자 4 출력 신호는 동위상을 갖는 신호이며, 단자 2 출력 신호와 단자 3 출력 신호는 180° 위상차를 갖는다.

2-2 메타물질 구조 6단자 위상상관기

메타물질 선로는 RH(Right-Handed) 선로와 LH(Left-Handed) 선로로 구성되는 CRLH TL 구조를 갖는다. RH 선로는 양(+)의 위상정수를 가지나, LH 선로는 음(-)의 위상정수를 갖는다.

여기서 그림 1의 6단자 위상상관기를 메타물질 구조로 사용할 경우, LH 선로의 위상 천이에 의해 메타물질 구조 6단자 위상상관기의 다중대역 동작 주파수 (ω_1, ω_2)에서 산란 계수는 식 (2)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[S]_{\text{meta-six}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \pm j & \pm j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pm j & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \pm j \\ \pm j & \pm j & -1 & -1 & 0 & 0 \\ \pm j & -1 & +1 & \pm j & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, \pm 는 CRLH 선로의 LH와 RH 선로에 대한 다중대역 동작 주파수 (ω_1, ω_2)의 산란 계수 부호이다. 즉, 메타물질 구조 6단자 위상상관기의 산란 계수 ([S]meta-six)는 다중대역 동작 주파수에 따라 양(+)의 부호 또는 음(-)의 부호를 갖는다.

식 (2)의 산란 계수와 동일하게 메타물질 구조 6단자 위상상관기는 단자 5 입력 신호에 대해 단자 1 출력 신호와 단자 2 출력 신호는 동일한 위상값을 갖는다. 그리고 단자 3 출력 신호와 단자 4 출력 신호도 동일한 위상값을 가지며, 단자 1 출력 신호와 단자 3 출력 신호와는 90° 위상차를 갖는다. 또한, 단자 6 입력 신호에 대해 단자 1 출력 신호와 단자 4 출력 신호는 동일한 위상값을 가지며, 단자 3 출력 신호는 단자 6 입력 신호와 동일한 위상값을 그리고 단자 2 출력 신호는 단자 3 출력 신호와 180° 위상차를 갖는다.

즉, 식 (3)의 메타물질 구조 6단자 위상상관기 출력 신호는 다중대역 동작주파수(ω_1, ω_2)의 한 주파수에서 동 위상 신호와 90° 위상 또는 -180° 위상을 가지고, 다른 동작 주파수에서는 동위상 그리고 -90° 또는 -180° 위상값을 가지나, 식 (2)와 같이 다중대역 동작주파수(ω_1, ω_2)에서 각각 6단자 위상 상관기의 출력 신호의 90° 위상차를 만족한다.

III. 메타물질 구조 6단자 위상상관기 설계 및 제작

3-1 메타물질 구조 6단자 소자 설계 및 성능

본 절에서는 식 (3) 관계를 만족하는 메타물질 구조 다중대역 6단자 위상상관기를 설계하고 제작한다. 이중 설계 주파수(ω_1, ω_2)대역에서 동작하는 그림 1과 같은 다중대역 위상상관기의 전력 분배기는 이중 주파수 대역을 포함하는 넓은 대역에서 동작하는 저항형 전력 분배기로 구성되며, 90° 하이브리드 결합기는 다중대역 메타물질 구조로 구성된다.

전력 분배기는 그림 2와 같이 3개의 저항으로 구성되어 3단자를 형성하고, 입력 단자 1에서 전압이 V_1 이면 출력 단자 2와 출력 단자 3에서의 전압은 전압 분배법칙에 의해 다음 식 (4)와 같다.

$$V_2 = V_3 = V \frac{Z_0}{Z_0 + Z_0/3} = \frac{3}{4} V = \frac{1}{2} V_1 \quad (4)$$

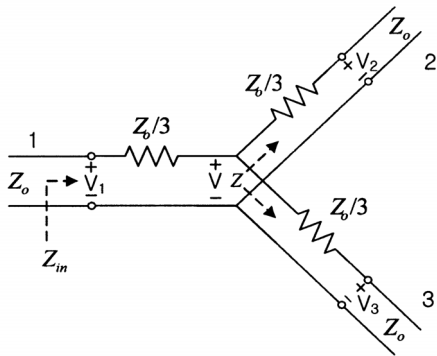


그림 2. 저항형 전력 분배기 구성도.
Fig. 2. Configuration of resistive power divider.

따라서 산란 계수 성분은 $S_{21} = S_{31} = S_{23} = 1/2$ 이며, 입력 전력보다 6 dB 낮음을 의미한다. 따라서 3개의 단자(1, 2, 3)가 대칭구조이고 가역적이므로 산란 계수 ([S]_{meta-pd})는 다음과 같다.

$$[S]_{meta-pd} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서 저항형 전력 분배기와 메타물질 구조 90° 하이브리드 결합기를 갖는 메타물질 구조 다중대역 6단자 위상상관기의 산란 계수는 식 (3)으로부터 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$[S_m] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \pm \frac{j}{\sqrt{2}} \pm j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pm \frac{j}{\sqrt{2}} - 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} + 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \pm j \\ \pm \frac{j}{\sqrt{2}} \pm \frac{j}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ \pm j & -1 & +1 & \pm j & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, 이중 주파수 대역(182 MHz, 510 MHz)에서 식 (6)을 만족하는 메타물질 구조 다중대역 6단자 위상상관기를 설계한다. 메타물질 구조는 그림 3과 같은 CRLH 선로 단위 셀을 사용하며, 3개의 단위 셀로 구성되는 메

타물질 구조 하이브리드 결합기의 소자 값은 식 (7)로부터 이중 설계 중심주파수(182 MHz, 510 MHz)에서 식 (6)의 위상정수를 만족하도록 한다[5].

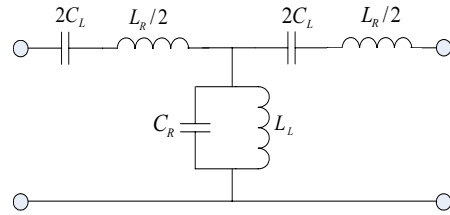


그림 3. CRLH 선로 단위 셀.
Fig. 3. Unit cell of CRLH transmission line.

$$L_R = \frac{Z_t[\phi_1(\omega_1/\omega_2) - \phi_2]}{N\omega_2[1 - (\omega_1/\omega_2)^2]} \quad (7)$$

$$C_R = \frac{\phi_1(\omega_1/\omega_2) - \phi_2}{Z_t N \omega_2 [1 - (\omega_1/\omega_2)^2]}$$

$$L_L = \frac{Z_t N [1 - (\omega_1/\omega_2)^2]}{\omega_1 [\phi_1 - (\omega_1/\omega_2)\phi_2]}$$

$$C_L = \frac{N [1 - (\omega_1/\omega_2)^2]}{Z_t \omega_1 [\phi_1 - (\omega_1/\omega_2)\phi_2]}$$

여기서, 요구 주파수 (ω_1, ω_2)의 전파 상수(β_1, β_2)와 정합 특성임피던스 Z_t 가 각각 다음과 같은 조건을 만족하도록 한다.

$$Z_{C(CRLH)} = Z_t, \quad \beta_{CRLH}(\omega_1) = \beta_1, \quad (8)$$

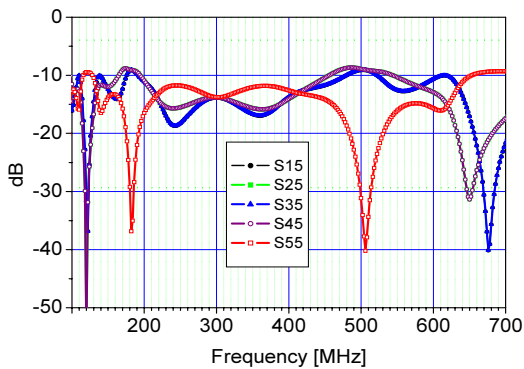
$$\beta_{CRLH}(\omega_2) = \beta_2, \quad \phi_1 = -\beta_1 l, \quad \phi_2 = -\beta_2 l$$

따라서 식 (7)로부터 요구 주파수 (ω_1, ω_2)에서 식 (6)의 위상값을 갖는 다중대역 주파수 특성을 갖는 CRLH 선로 구조를 설계할 수 있다. 여기서, 이중 주파수 대역 (182 MHz, 510 MHz)에서 3개의 셀을 갖는 그림 3의 메타물질 구조의 계산된 소자 값은 표 1과 같다.

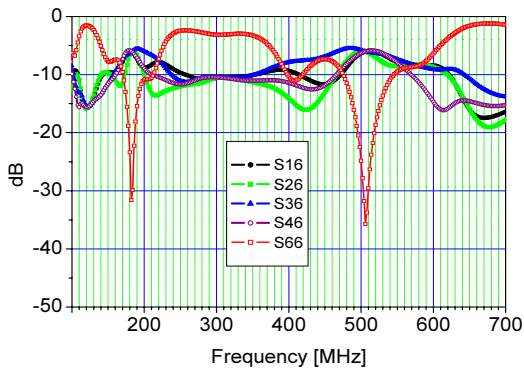
표 1. 이중 대역 메타물질 구조 소자의 이론값
Table 1. Theoretical values of dual-band CRLH

	L_R (nH)	C_R (pF)	L_L (nH)	C_L (pF)
$50\Omega, \lambda/4$	12.7	5.1	53.7	21.5
$35\Omega, \lambda/4$	9	7.2	38	30.4

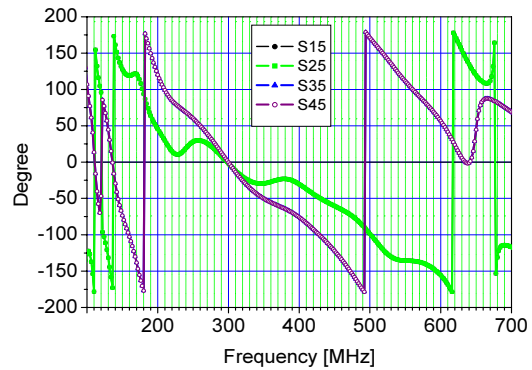
그림 4는 표 1의 값을 갖는 메타물질 구조 다중대역 위상상관기의 반사 계수와 전달 계수의 이득특성, 그리고 전달 계수의 위상 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 그림 4에 의하면 이중 주파수 대역(182 MHz, 510 MHz)에서 정합된 상태를 나타내며, 약 -32 dB 이하의 반사 손실 특성을 갖는다. 또한 이중 주파수 대역에서 5 단자에 대한 전달 이득은 약 -9.1 ~ -9.2 dB 그리고 6 단자에 대해서는 약 -5.9 ~ -6.2 dB이며, 두 단자간의 이득차는 저항형 전력 분배기의 삽입손실이다.



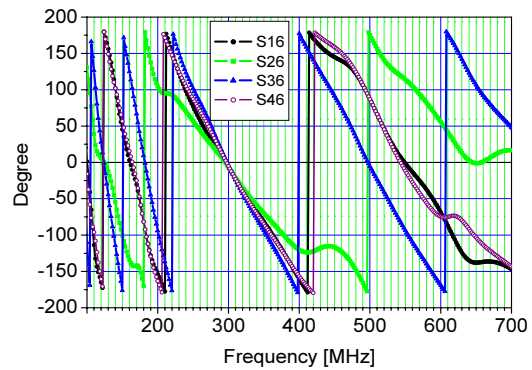
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. 메타물질 구조 6단자 위상상관기의 시뮬레이션 결과, (a) 단자 5 반사 손실과 전달 이득, (b) 단자 6 반사 손실과 전달 이득, (c) 단자 5 전달 위상, 그리고 (D) 단자 6 전달 위상.

Fig. 4. Simulation results of metamaterial six-port phase correlator, return loss and transmission gain of (a) port 5, (b) port 6 and transmission phase for (c) port 5 and (d) port 6.

그리고 전달 위상차는 5 단자에 대한 단자 1과 단자 2, 그리고 단자 3과 단자 4는 동위상이며, 두 단자 신호는 약 90.5° 위상차를 갖는다. 또한 단자 6에 대하여 단자 1과 단자 4는 동위상이며, 단자 1과 단자 3은 약 180.5° 위상차를 갖는다. 따라서 그림 4로부터 설계된 메타물질 구조 다중대역 6단자 위상상관기는 식 (6)과 같은 산란 계수를 갖는 것을 확인할 수 있다.

3-2 메타물질 구조 6단자 소자 제작 및 측정

메타물질 구조 다중대역 6단자 위상상관기 제작은 로

저스사의 10.2 유전율과 50 mil 두께를 갖는 기판을 사용하였으며, 집중소자 CRLH 선로 구조로 LH 선로와 RH 선로를 구현하며, 사용 가능한 집중소자를 고려하여 최적화 설계 제작한다.

그림 5는 제작된 집중소자 메타물질 3셀 구조의 다중대역 6단자 위상상관기이다. 그림 6은 제작된 메타물질 구조 다중대역 6단자 위상상관기의 측정 성능값을 보여준다. 그림 6으로부터 제작된 집중소자형 메타물질 구조 6단자 위상상관기의 측정값은 설계 중심주파수 대역 (182 MHz, 510 MHz)에서 시뮬레이션 결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

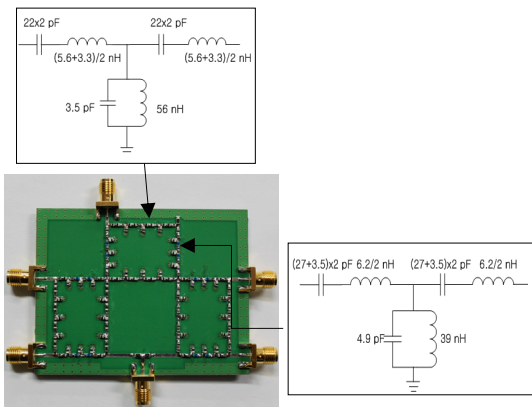


그림 5. 제작된 다중대역 메타물질 구조 6단자 위상상관기.

Fig. 5. Fabricated multi-band metamaterial six-port phase correlator.

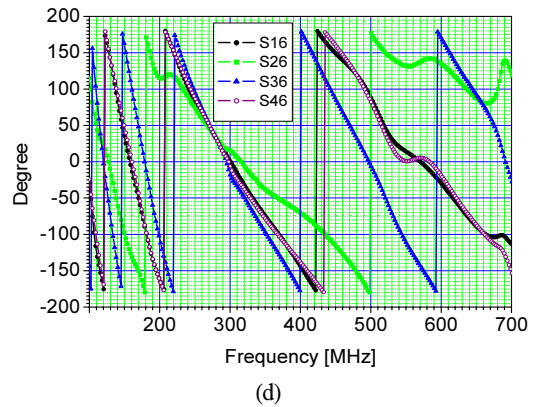
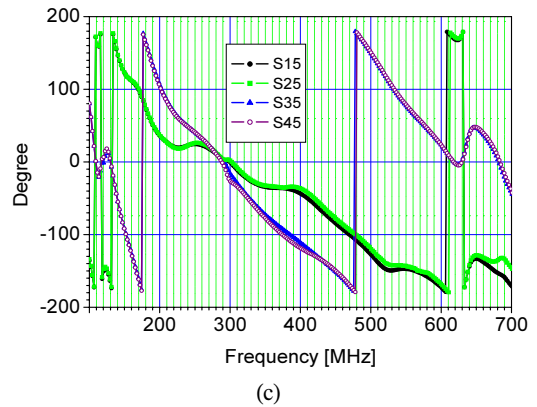
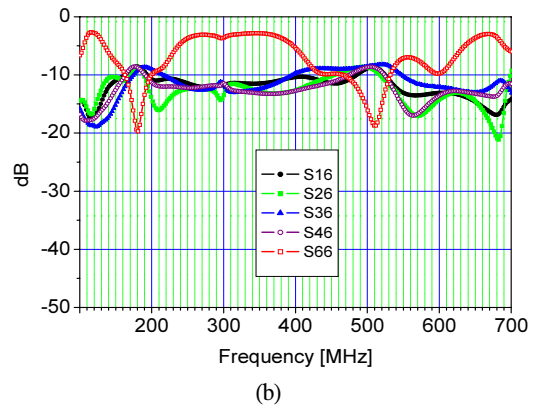
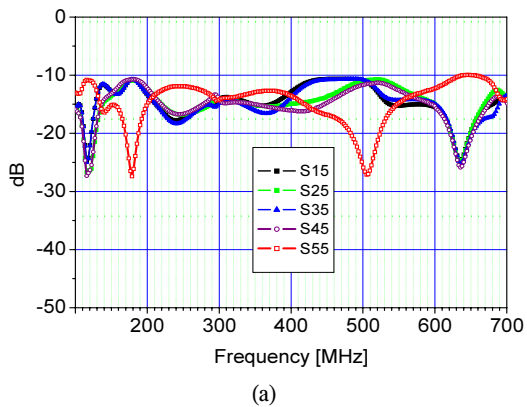


그림 6. 메타물질 구조 6단자 위상상관기의 측정 결과, (a) 단자 5 반사 손실과 전달 이득, (b) 단자 6 반사 손실과 전달 이득, (c) 단자 5 전달 위상, 그리고 (d) 단자 6 전달 위상.

Fig. 6. Measured results of metamaterial six-port phase correlator, return loss and transmission gain of (a) port 5 and (b) port 6, transmission phase for (c) port 5 and (d) port 6.

그림 6의 측정 결과로부터 이중 대역 중심주파수 (181.5 MHz, 507.9 MHz)에서 반사 손실은 단자 5에서 약 -27.5 dB이며, 단자 6에서는 약 -20 dB로 이중 주파수 대역에서 양호하게 동작하고 있음을 알 수 있다. 또한 이중 주파수 대역에서 전달 이득 특성은 단자 5에 대하여 약 -10.7 dB~ -11.6 dB 정도이며, 단자 6에 대해서는 약 -8.4 dB~ -9.3 dB 정도로 1 dB 이내의 이득차를 갖는다.

그림 6(c)와 그림 6(d)로부터 6단자 위상상관기의 전달 위상 특성을 살펴보면, 단자 5에 대하여 단자 1과 단자 3은 90° 위상차를 가지며, 단자 1과 단자 2는 약 ±0.8° 이내 범위에서 동위상 관계를 가지며, 아울러 단자 3과 단자 4도 약 ±4.1°의 위상차 범위내에서 동위상 관계를 갖는다. 또한 단자 6을 기준으로, 단자 1과 단자 4는 약 ±3.8° 위상차 이내에서 동위상 관계를 가지며, 단자 2와 단자 3은 약 ±3.5° 위상차 범위내에서 180° 위상 관계를 갖는다. 따라서 그림 6으로부터 제작된 메타물질 구조 다중대역 6단자 위상상관기는 약 1 dB 이내의 이득차와 약 ±4.1° 위상차를 갖는 양호한 6단자 위상상관기 특성으로, 식 (6)과 같은 산란 계수를 갖는 다중대역 6단자 위상상관기로 동작함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 메타물질 구조 다중대역 6단자 위상상관기를 설계하고 제작하였다. 다중대역 주파수 수용을 위하여 메타물질 구조의 6단자 위상상관기 산란 계수를 해석하고, 집중소자형 메타물질 구조로 설계 구현하였다. 제작된 메타물질 구조 6단자 위상상관기는 이중 주파수 대역에서 -20 dB 이하의 정합과 약 1 dB 이내의 전달 이득 차, 그리고 약 ±4.1° 이하의 전달 위상차 특성으로 양호한 다중대역 6단자 위상상관기 성능을 나타내었다. 집중소자형 메타물질 구조로 낮은 주파수 대역에서 소형화 구현과 집중소자형 전력 검파기 등과 일체화가 가능하며, 다중대역 6단자 직접 변환 방식을 위한 6단자 위상상관기 구조로 적합함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] M. Abe, N. Sasho, V. Brankovic and D. Krupe zevic, "Direct conversion receiver MMIC based on six-port technology," in *Proc. Eur. Wireless Tech. Conf.*, pp. 139- 142, 2000.
- [2] 김영완, "SDR 직접변환 수신기를 위한 적층형 탠덤 6 단자 상관기", *Telecommunications review*, 제 17권, 제 3호, pp. 432-444, 2007.
- [3] X. Xu, R. G. Bosisio, and Ke Wu, "Analysis and implementation of six-port software- defined radio receiver platform," *IEEE Trans. on MTT*, vol. 54, no. 7. pp. 2937-2943, July 2006.
- [4] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [5] Ih Lin, M. Devincintis, C. Caloz, and T. Itoh, "Arbitrary dual-band components using composite right/left-handed transmission lines," *IEEE Trans. on MTT*, vol. 52, no. 4, pp. 1142-1149, 2004.

저자소개



김영완(Young-wan Kim)

1983년 경북대학교 전자공학사
 1985년 경북대학교 전자공학석사
 2003년 충남대학교 전자공학박사
 1984~1990 동양정밀공업(주)
 중앙연구소 과장

1990~1992 (주) 유영통신 이사
 1992~2004 한국전자통신연구원 책임연구원
 2004~현재 군산대학교 전파공학과 교수
 ※관심분야: RF/Microwave 시스템 및 회로설계,
 디지털 위성방송/통신시스템, 마이크로파 소자