
다중대역 6단자 직접변환 방식을 위한 전력 검파기 설계 및 제작

김영완*

Design and fabrication of power detector for multi-band six-port direct conversion method

Young-Wan Kim*

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업
지원을 받아 수행된 것임(2009-0071956)

요 약

본 논문에서는 다중대역 6단자 직접변환 방식을 위한 메타물질 구조 전력 검파기를 설계하고 제작하였다. 다중대역 주파수를 수용하는 RF 단락회로를 메타물질 구조로 구성하여 다중대역 전력 검파기 구조를 해석하고, 집중소자와 분포정수 소자를 갖는 메타물질 구조 전력 검파기를 제작하였다. 제작 측정된 메타물질 구조 RF 단락회로는 시뮬레이션 결과와 일치하였으며, 집중소자 메타물질 구조 RF 단락회로는 1 dB 이내의 삽입손실과 설계 중심주파수와 일치하는 대역폭 특성을 나타내었다. 분포정수형 구조 RF 단락회로는 다소 적은 삽입손실과 양호한 대역폭 특성을 나타내었으며, 메타물질 구조 RF 단락회로를 갖는 전력 검파기는 다중대역 주파수 영역에서 양호하게 RF 입력 신호를 검파하여 기저대역 신호를 발생하였다.

ABSTRACT

In this paper, the power detectors using metamaterials were designed and fabricated for multi-band six-port direct conversion method. The RF short-stubs for power detector were designed by using metamaterials which provide multi-band characteristics. The power detectors with metamaterial RF short-stub were analyzed and fabricated by using lumped and distributed element. The measured results of metamaterial power detectors show the good agreement with the simulation results. The performance of lumped-metamaterial RF short-stub shows the insertion loss below 1 dB and the good frequency response characteristics. Also, the distributed-metamaterial RF short-stub shows the good frequency response characteristics and the insertion loss under that of lumped-metamaterial RF short-stub. The multi-band power detectors with metamaterial RF short-stub detect the input RF signal in the designed dual frequency bands very well.

키워드

다중대역 6단자 직접변환, 전력 검파기, 메타물질 구조 전력 검파기

Key word

Multi-band six-port direct conversion, Power detector, Metamaterial power detector

* 군산대학교(ywkim@kunsan.ac.kr)

접수일자 : 2010. 03. 06

심사완료일자 : 2010. 03. 25

I. 서 론

6단자 소자를 사용하는 직접변환 방식은 6단자 위상 상관기와 전력 검파기, 그리고 I/Q 신호 재생기로 구성된다[1].

6단자 직접변환은 전력 분배기와 90° 또는 180° 위상 관계를 갖는 하이브리드 결합기를 사용하는 회로 구성으로, 일반적으로 분포정수 선로로 구현하거나 등가 집중회로 소자로 구현하고 있다[2]. 이러한 분포정수 선로를 사용하는 전력 분배기와 하이브리드 결합기 소자의 회로 패턴 길이는 $\lambda/4$ (λ : 파장)이므로 사용하는 주파수에 따라 6단자 직접변환 소자 회로 크기가 고정되어 크기 조절이 어렵고, 단일 주파수 대역을 갖는 사용 주파수의 한계를 갖는다[3][4]. 이러한 크기 제한에 따른 소형화 회로 실현을 위하여 사용 주파수 대역에 의해 결정된 회로 구성 면적을 MMIC 설계 단계에서 layout 배치에 따라 일정한 범위 내에서 조절하고 있으나, 조절 범위에 한계가 있으며 근본적인 회로 축소가 가능하지 않아 직접변환 방식의 장점인 소형화에 제한적 요소로 작용하고 있다[5]. 따라서 고정된 단일 채널 주파수와 협대역 특성으로 광역화가 어려우며, 단말 크기의 제한으로 소형화 구조를 갖는 다중대역 SDR 기반 이동/휴대 통신 시스템 및 단말 방식에 제약 조건으로 나타난다.

본 연구에서는 다중대역 신호처리와 소형화 구현을 위한 6단자 직접변환 방식 전력 검파기 구조를 해석하고 설계 구현한다. 메타물질 구조를 사용하여 다중대역 전력 검파기 구조를 구현하고, 낮은 주파수 대역에서 소형화 구현을 위한 집중소자형 메타물질 구조를 설계 구현하여 사용주파수와 크기에 대한 제한성을 해결한다.

전력 검파기 소자는 다중대역에서 6단자 위상 상관기와 정합되고, VHF, UHF 그리고 L-대역 사용 주파수에서 집중소자형과 분포정수형 선로 메타물질 스텐드 구조를 해석하고 설계·구현한다. 다중대역 사용주파수에서 양호한 단락 스텐드 특성을 갖는 메타물질 구조 전력 검파기는 2개 이상의 주파수 영역에서 6단자 위상 상관기와 결합되어 다중대역 6단자 직접변환 방식을 구성할 수 있다.

II. 메타물질 구조 전력 검파기

2.1 전력 검파기

6단자 직접변환 방식에서 사용되는 전력 검파기는 4개의 6단자 위상상관기 출력 신호를 기저대역 신호로 정류한다. 그림 1과 같이 전력 검파기 입력단은 6단자 위상상관기와의 정합을 위하여 저항성 정합을 사용하며, 출력 회로는 RF 신호 및 고주파 신호를 제거하기 위하여 사용 주파수에서 RF 신호를 단락하는 회로와 고주파 신호 차단 주파수를 갖는 저역 통과 필터로 구성된다.

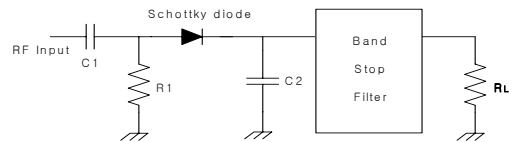


그림 1. 전력 검파기 구조.
Fig. 1. Power detector configuration.

전력 검파기는 기저대역 출력이 입력 RF 신호 전력의 크기의 제곱에 비례하는 제곱 특성(square-law)을 갖고 있다. 그러므로 6단자 직접변환 방식 4개의 전력 검파기의 기저대역 출력 전압은 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_i = K_i |b_i|^2, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

여기서, 상수 K_i 는 입력 RF 신호 전력에 대한 기저대역 출력 전압을 나타내는 전압 감도(V/W)이다. 전압 감도는 다이오드가 개방되어 있을 때, 정합 저항 양단의 전압 강화로 정의할 수 있다.

전력 검파기에 입력되는 6단자 위상상관기 출력 신호의 한 신호를 다음 식 (2)와 같이 표현하면[6],

$$b_1 = \sin(\omega t) \pm \cos(\omega t + \theta) \quad (2)$$

전력 검파기 출력 신호는 다음 식 (3)과 같다.

$$V_1 = K_1 b_1^2 = \sin^2(\omega t) \pm 2\sin(\omega t)\cos(\omega t + \theta) + \cos^2(\omega t + \theta) \quad (3)$$

저역 통과 및 RF 단락회로를 통과 한 신호는 다음 식 (4)와 같이 기저대역 신호로 출력된다.

$$V_{pd1} = 1 \mp \sin(\theta) \quad (4)$$

식 (4)로부터 전력 검파기의 출력 신호인 기저대역 신호는 식 (2)와 같이 수신되는 입력 신호의 위상 정보 신호에 의존함을 알 수 있다. 따라서 동일한 전력 검파기 ($K_i = K$)를 사용하였을 때 6단자 위상상관계에서 출력된 네 개의 신호를 식 (1)에 대입하면 전력 검파기 4개의 출력 신호는 기저대역 전압 값이 90도 간격의 일정한 위상 관계를 가지며 변함을 알 수 있으며, 전력 검파기의 4개의 출력 신호를 이용하여 PSK 신호를 간단하게 복원할 수 있다.

2-2 메타물질 구조

RH(Right-Handed) 선로와 LH(Left-Handed) 선로로 구성되는 그림 2와 같은 단위 셀을 갖는 CRLH 전송 선로의 전파 상수와 특성임피던스는 다음 식(5)와 같이 표현된다[7][8].

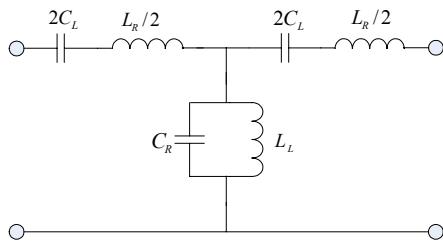


그림 2. CRLH 선로 단위 셀.
Fig. 2. Unit cell of CRLH transmission line.

$$\beta_{CRLH} = \omega \sqrt{L_R C_R} - \frac{1}{\omega \sqrt{L_L C_L}} \quad (5)$$

$$Z_{C(CRLH)} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}}$$

식 (5)로부터 다중대역 CRLH 구현을 위하여 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.

$$Z_{C(CRLH)} = Z_t, \quad (6)$$

$$\beta_{CRLH}(\omega_1) = \beta_1, \quad \beta_{CRLH}(\omega_2) = \beta_2$$

식 (5)를 식 (6)에 대입하여 단위 셀의 L과 C 관련식으로 정리하면 다음 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

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

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

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

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

여기서, CRLH 선로의 위상 천이(ϕ_1, ϕ_2)는 요구 주파수 (ω_1, ω_2)에서의 위상값이며, $\phi_1 = -\beta_1 l$ 과 $\phi_2 = -\beta_2 l$ (l 은 전송 선로의 물리적 길이)관계를 만족한다.

CRLH 선로의 위상 천이는 그림 3과 같이 LH 선로에서는 양(+)의 위상값을 그리고 RH 선로는 음(-)의 위상값을 나타내며, 다음과 같은 위상 천이 관계를 만족한다.

$$\phi_C = \phi_R + \phi_L \quad (8)$$

요구 주파수 (ω_1, ω_2)에서 식 (8)의 위상값을 선정하여 다중대역 주파수 특성을 갖는 CRLH 선로 구조를 설계할 수 있다.

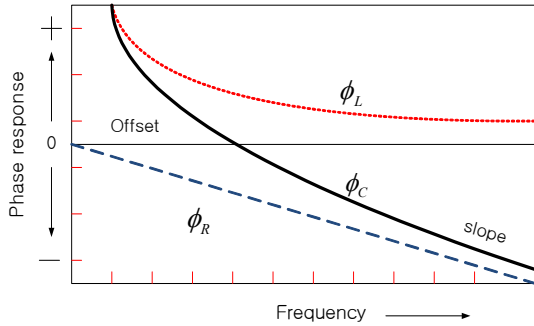


그림 3. CRLH 선로 위상 특성.
Fig. 3. Phase response of CRLH transmission line.

III. 메타물질 구조 전력 검파기 설계 및 제작

본 연구에서는 집중소자형 메타물질 구조 전력 검파기와 분포정수형 메타물질 구조 전력 검파기를 설계 제작한다. 전력 검파기는 그림 1과 같이 입력 정합회로와 출력단 RF 단락회로 및 지역 통과 필터로 구성된다. 입력단은 6단자 위상상관기의 출력 특성임피던스와 같은 저항성 정합을 사용하며, 출력단 RF 단락회로는 그림 4와 같이 메타물질 구조로 설계된다.

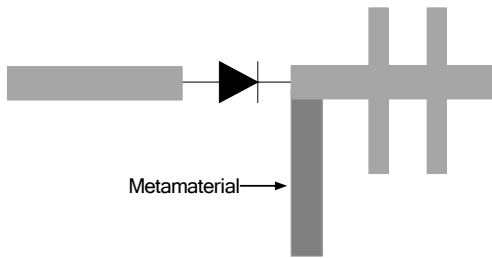


그림 4. 메타물질 단락회로를 갖는 전력 검파기 구조.
Fig. 4. Power detector layout with metamaterial short-stub.

집중소자형 메타물질 구조는 이중 주파수 182 MHz와 510 MHz에서 그림 2의 T-형태의 단위 셀 구조를 사용하며, 분포정수형 메타물질 구조는 이중 주파수 860 MHz와 1520 MHz에서 그림 5와 같은 전송 선로를 사용한다.

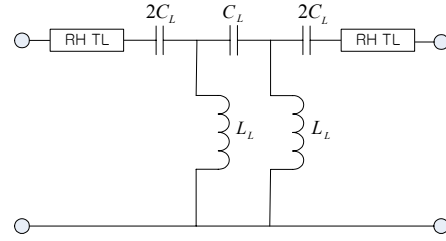


그림 5. 분포정수형 CRLH 전송 선로.
Fig. 5. Distributed-CRLH transmission line.

메타물질 이중 주파수 f_1, f_2 에서 $(\pi/2, -\pi/2)$ 과 $(-\pi/2, -3\pi/2)$ 위상 특성을 설정하고 식 (7)을 만족하는 메타물질 선로의 소자 값을 설정한다. 분포정수형 메타물질의 RH 선로는 다음 식(9)를 만족하는 전송선을 구현한다.

$$Z_{C(RH)} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}}, \quad \phi_{1R} = -N\omega_1 \sqrt{L_R C_R} \quad (9)$$

따라서 식 (7)과 식 (9)로부터 3단과 2단을 각각 사용한 집중소자형 메타물질 구조와 분포정수형 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)
집중소자형	12.7	5.1	53.7	21.5
분포정수형	182.30		11.4	4.5

전력 검파기의 제작은 로저스사의 10.2 유전율과 50 mil 두께를 갖는 기판을 사용하였으며, 집중소자와 분포정수 CRLH 선로 구현시 발생하는 RH 기생 성분을 고려하여 최적화 설계 제작한다.

그림 6은 제작된 집중소자와 분포정수형 메타물질 구조 RF 단락회로이다. 그림 7과 그림 8은 제작된 집중소자와 분포정수형 메타물질 구조 단락회로의 측정 성능 값과 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 7로부터 제작된 집중소자형 메타물질 구조 RF 단락회로의 측정값은 설계 중심주파수 영역(182 MHz, 510 MHz)에서 시뮬레이션 결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

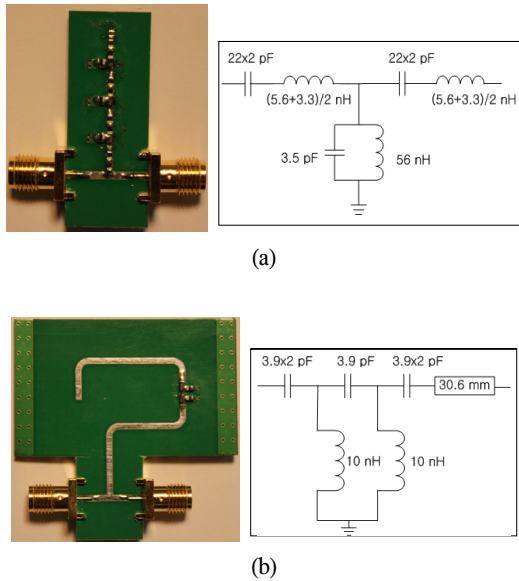


그림 6. 제작된 다중대역 메타물질 구조 RF 단락 회로, (a) 집중소자형과 (b) 분포정수형.
 Fig. 6. Fabricated multi-band metamaterial RF short-stub, (a) lumped element and (b) distributed element.

그림 7(b)의 측정 결과로부터 이중대역 중심주파수 (181.5 MHz, 507.9 MHz)에서 삽입손실은 약 1.03 dB와 0.78 dB 정도이며, 대역폭은 -10 dB 기준시 각각 26 MHz와 약 62 MHz로 이중주파수 영역에서 양호하게 동작하고 있음을 알 수 있다. 또한 낮은 Q 값을 갖는 집중소자로 시뮬레이션 결과보다는 삽입손실이 발생하고 대역폭이 증가되는 현상이 발생한다.

그림 8의 분포정수형 메타물질 구조 RF 단락회로의 측정값도 설계 중심주파수 영역(860 MHz, 1520 MHz)에서 시뮬레이션 결과와 거의 동등한 특성을 나타내고 있으며, 이중대역 중심주파수(856 MHz, 1513 MHz)에서 삽입손실은 약 0.54 dB와 0.72 dB 성능을 갖는다. 그리고 -10 dB 대역폭 기준시 이중주파수 영역에서 대역폭은 각각 70 MHz와 63 MHz 정도이다. 분포정수형 메타물질 구조 RF 단락회로도 설계된 이중주파수 영역에서 양호하게 동작하고 있으며, 분포정수 소자 사용으로 집중소자형보다 다소 낮은 삽입손실과 대역폭 특성이 양호하게 나타난다.

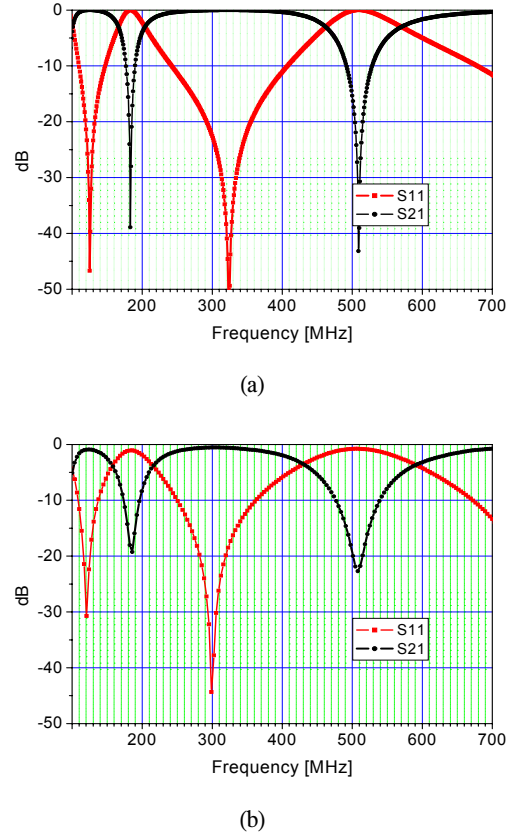
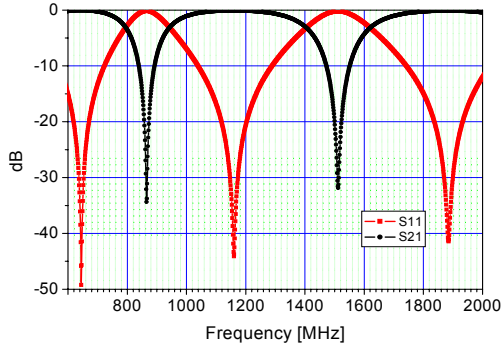


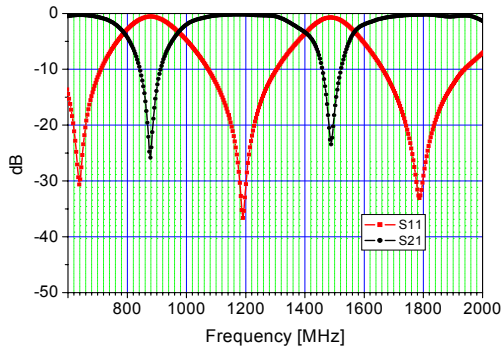
그림 7. 집중소자형 메타물질 구조 RF 단락회로의 성능, (a) 모의 성능값과 (b) 측정값.
 Fig. 7. Performance results of lumped-metamaterial RF short-stub, (a) simulation and (b) measurement.

그림 9는 그림 7과 그림 8의 집중소자형 메타물질 구조 RF 단락회로와 분포정수형 메타물질 구조로 설계 제작된 다중대역 전력 검파기이다. 전력 검파기 입력단은 이중주파수 영역을 포함하는 넓은 주파수 영역에서 정합을 갖는 저항성 정합회로를 가지며, 출력단은 RF 단락회로와 저역 통과 필터로 설계 제작되었다.

이중주파수 영역에서 입력 RF 신호를 검파하는 전력 검파기 검파 성능은 그림 10과 같다. 집중소자형 메타물질 구조를 갖는 다중대역 전력 검파기의 검파 성능은 그림 10(a)와 같이 182 MHz 주파수 영역에서 -25 dBm ~ 15 dBm 입력 신호에서 약 0.001~0.645 V의 기저대역 신호가 출력된다.

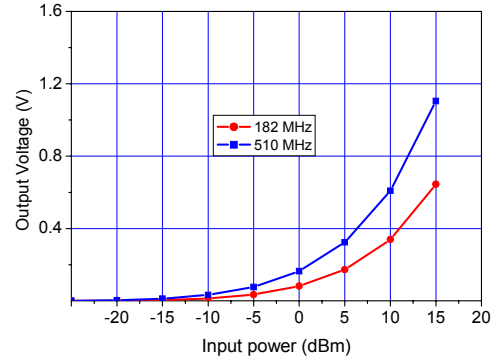


(a)

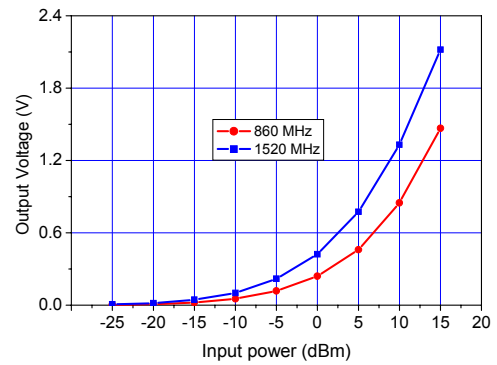


(b)

그림 8. 분포정수형 메타물질 구조 RF 단락회로의 성능, (a) 모의 성능값과 (b) 측정값.
Fig. 8. Performance results of distributed-metamaterial RF short-stub, (a) simulation and (b) measurement.

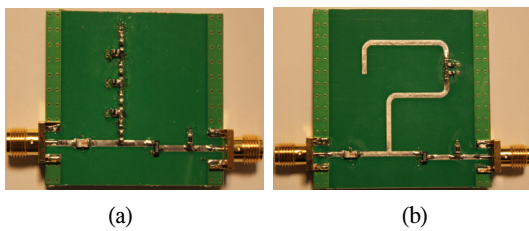


(a)



(b)

그림 10. 다중대역 전력 검파기의 검파 성능, (a) 집중소자형과 (b) 분포정수형.
Fig. 10. Detection performance of multi-band power detectors, (a) lumped type and (b) distributed type.



(a)

(b)

그림 9. 제작된 다중대역 전력 검파기, (a) 집중소자 메타물질 구조와 (b) 분포정수형 메타물질 구조.
Fig. 9. Fabricated multi-band power detectors, (a) lumped-metamaterial and (b) distributed-metamaterial.

또한, 510 MHz 에서는 약 0.001~1.105 V의 검파 신호가 발생한다.

분포정수형 메타물질 구조 전력 검파기의 성능은 그림 10(b)로부터 860 MHz 대역에서 약 0.003~1.467 V, 그리고 1512 MHz 영역에서는 0.006~2.12 V 신호가 검파되고 있음을 알 수 있다. 따라서 그림 10으로부터 메타물질 구조 전력 검파기는 이중주파수 영역에서 검파 특성을 갖는 다중대역 전력 검파기 구조를 갖는 것을 알 수 있으며, 양호한 검파 성능을 갖는다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다중대역 6단자 직접변환 방식을 위한 전력 검파기 구조를 설계하고 제작하였다. 다중대역 주파수 수용을 위하여 메타물질 구조로 전력 검파기의 RF 단락회로를 설계하고, 집중소자와 분포정수 소자를 사용하여 182 MHz와 510 MHz 그리고 860 MHz와 1512 MHz 중심 주파수를 갖는 메타물질 구조를 구성하였다. 집중소자형 메타물질 구조 RF 단락회로는 1dB 이내의 삽입손실이 발생하였으며, 분포정수형 전력 검파기는 다소 낮은 삽입손실 및 양호한 대역폭 특성을 나타내었다. 메타물질 구조 RF 단락회로를 갖는 메타물질 구조 전력 검파기는 이중 주파수에서 양호한 검파 성능을 나타내었으며, 다중대역 6단자 직접변환 방식을 위한 전력 검파기 구조로 적당함을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] J. Hyrylainen, L. Bogod, S. Kangasma, H. O. Scheck, and T. Ylämurto, "Six-port direct conversion receiver," in *Proc. 27th Eur. Wireless Tech. Conf.*, pp. 139-142, 2000.

[2] S.O. Tatu, E. Moldovan, Ke Wu, et al, " Ka-band analog front-end for software- defined direct conversion receiver", *IEEE Trans. on MTT*, vol. 53, no. 9, Sep. 2005.

[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] M. Abe, N. Sasho, V. Brankovic and D. Krupcevic, " Direct conversion receiver MMIC based on six-port technology," in *Proc. Eur. Wireless Tech. Conf.*, pp. 139- 142, 2000.

[5] S. O. Tatu, E. Moldovan, Ke Wu and Renato G. Bosisio, "A new direct millimeter-wave six-port receiver," *IEEE Trans. on MTT*, vol. 49, no. 12, December 2001.

[6] 장명신, 김영완, 고남영, "6-단자를 이용한 직접 변환 수신 전 처리부 설계", 한국해양정보통신학회논문

지, 제 9권, 7호, pp. 1534-1540, 2005.

[7] S. Lim, C. Caloz and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line meta- materials," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 34-50, Sep. 2004.

[8] 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