

RHTL과 LHTL 형태의 위상변위기를 이용한 주파수 변환기 성능비교

The Performance Comparison of Frequency Translators Using RHTL and LHTL Phase Shifters

한 희 제* · 박 홍 우** · 김 홍 준†
 (Heejae Han · Hongwoo Park · Hongjoon Kim)

Abstract - In this paper, we compared the performances of the Right Handed Transmission Line (RHTL) and the Left Handed Transmission Line (LHTL) phase shifters as a frequency translator. Unlike other phase shifters, both phase shifters show a 0° - 360° phase variation for a broadband frequency and compact in size which are ideal to use as a frequency translator. For the performance comparison, we fabricated both a RHTL and a LHTL phase shifter to cover 1.5 GHz - 2.4 GHz range with the whole 360° phase variation. For the frequency range, a LHTL based frequency translator showed a much better performance whose Spurious Free Dynamic Range (SFDR) is 4dB - 17dB higher than the RHTL based frequency translator when the sawtooth modulation frequency is 11 kHz. This is due to the linear phase-voltage variation of LHTL phase shifter. Furthermore, the LHTL phase shifter shows a less insertion loss and a insertion loss variation than the RHTL phase shifter. Overall, the LHTL based frequency translator outperformed RHTL based frequency translator

Key Words : Phase shifter, Frequency translator, LHTL, RHTL, SFDR

1. 서 론

주파수 변환기는 초고주파를 이용하는 시스템에서 널리 사용되고 있는 회로이다. 주로 사용되는 분야는 회로망 분석기[1], 위성과의 통신[2], 항공전에서 비행기의 속력을 속여 적군을 교란시키는 ECM(Electronic Counter Measures) [3]등이다. 주파수를 변화시키기 위해서는 입력된 초고주파 신호의 위상을 시간에 따라 바꿀 수 있어야 하는데, 위상변위기에 시간에 따라 변하는 신호를 조절 전압으로 입력하면 이를 구현할 수 있다. 위상변위기는 다양한 종류가 있으나 360° 위상조절이 가능하며, 광대역 특성을 가지면서 소형 제작을 할 수 있는 위상변위기는 매우 드물다.

본 논문에서는 위의 조건들을 만족시키는 위상변위기의 구조중 하나인 Right Handed Transmission Line (RHTL)과 Left Handed Transmission Line (LHTL)구조의 위상변위기를 이용하여 주파수 변환기를 제작한 뒤 성능을 비교하고 실험적 고찰을 하였다. 특히 LHTL구조의 위상변위기의 경우 다른 위상변위기와는 다르게 광대역이며, 조절 전압에 따라 선형적으로 위상을 변화시킬 수 있기 때문에 DAC를

이용하여 복잡한 파형을 인가하지 않고 톱니파만 입력하더라도 매우 좋은 SFDR(신호 대 잡음비)를 보임을 확인할 수 있었다.

2. RHTL과 LHTL구조를 이용한 위상변위기 이론

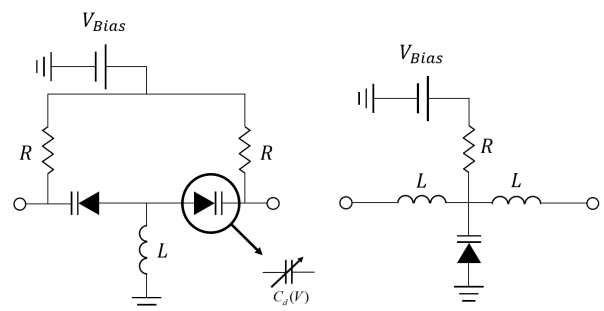


그림 1 LHTL(좌)와 RHTL(우) 위상변위기 한 셀의 회로 구성도

Fig. 1 The Circuit topology of a unit cell of a LHTL (left) and a RHTL (right) phase shifters.

RHTL과 LHTL 구조에 커패시터 대신 전압 가변형 커패시터의 용도로 사용할 수 있는 벡터 다이오드를 삽입한 후 DC 바이어스로 벡터 다이오드의 커패시턴스를 조정하면, 위상변위기로 사용이 가능하다 (그림 1). 전송선로 구조에서 출력 신호의 위상을 결정하는 것은 위상변위 계수(β)이다. 위상 변위 계수(β)는 전송선로의 구조에 따라 다르게 나타난다. RHTL 위상변위기 [1]와 LHTL 위상변위기 [4] 한

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Korea

E-mail : Hongjoon@knu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Korea

** Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Korea

Received : January 13, 2014; Accepted : February 19, 2014

셀당 위상 변위 계수는 아래의 식과 같이 각각 다른 형태이다. 여기서 ω 는 주파수에 2π 를 곱한 각주파수를 의미한다.

$$\beta_{LHTL}(V) \approx -\frac{1}{w\sqrt{L \cdot C_d(V)}} \quad (1)$$

$$\beta_{RHTL}(V) \approx w\sqrt{L \cdot C_d(V)} \quad (2)$$

RHTL 구조는 일반적인 전송선의 구조와 비슷한 저역통과 필터 형태의 구조이다. 따라서 위상 변위 계수 또한 일반적인 전송선로와 유사한 형태를 가진다. LHTL 구조는 고역통과 필터 형태의 구조이며 일반적인 전송선로와는 다른 구조를 가진다. 위상 변위 계수는 회로의 인덕턴스와 커패시턴스에 의해 결정되는데 전압에 따라 커패시턴스를 변화시킬 수 있는 소자인 벡터 다이오드를 사용하여 출력의 위상을 조정한다. RHTL과 LHTL의 위상 변위 계수가 다르기 때문에 같은 벡터 소자를 쓰더라도 전압에 대한 위상의 변화량이 달라진다. 전압과 벡터 커패시턴스의 관계는 다음과 같은 식으로 표현된다[5].

$$C_d(V) = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{V}{V_{bi}}\right)^{\frac{1}{m+2}}} \quad (3)$$

여기서 V 는 다이오드 바이어스 전압이며, C_0 는 제로 바이어스 (Zero-bias) 다이오드 커패시턴스이며, V_{bi} 는 다이오드 장벽전압이고, $C_d(V)$ 는 다이오드 커패시턴스이며, m 은 특정 도핑 프로파일(profile)을 가지기 위한 상수이다. m 은 -2 보다 큰 값만 가질 수 있다[5]. 많은 양의 커패시턴스 변화를 위해 m 을 -1.5로 하는 경우가 있는데, 이러한 도핑 프로파일의 다이오드를 하이퍼-에브리프트 접합(Hyper-abrupt Junction) 벡터 다이오드라고 한다. 이러한 다이오드를 사용하면 식 4와 같이 LHTL구조의 위상변위기는 전압에 선형적인 위상변화를 출력할 수 있지만[4], RHTL 구조의 위상변위기는 식 5와 같이 전압의 -1승에 비례하여 위상이 변화한다[6].

$$\beta_{LHTL}(V) \approx -\frac{\left(1 + \frac{V}{V_{bi}}\right)}{w\sqrt{LC_0}} \quad (4)$$

$$\beta_{RHTL}(V) \approx \frac{w\sqrt{LC_0}}{\left(1 + \frac{V}{V_{bi}}\right)} \quad (5)$$

이 때 위상변위기를 원하는 주파수에서 360° 변화하도록 하기 위해서는 사용하고자 하는 벡터 다이오드의 최대 커패시턴스 값과 최소 커패시턴스 값을 얻어내어 사용하고자 하는 주파수에서 β 값의 변화 가능한 범위를 산출한 뒤, 360° 만큼 위상변위를 할 수 있는 셀의 개수를 정해야 한다. 위상변위기가 광대역 특성을 가지도록 만들기 위해서는 사용하고자 하는 주파수 영역 내에서 360° 만큼 위상변위를 할 수 있도록 셀의 개수를 적절하게 조정해 주는 것이 중요하다.

3. 주파수 변환기 이론

정현파의 시간영역 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(t) = A \sin(2\pi ft + \phi) + B \quad (3)$$

여기서 A 는 신호의 크기이며, B 는 DC 오프셋이며, f 는 주파수, ϕ 는 위상이다. 위상이 $1/f_m$ 의 시간 동안에 360° 한 주기가 지연되는 시간영역 신호라면 위상 ϕ 는 $2\pi f_m t$ 가 되고 정현파의 식은 다음과 같이 변할 수 있다.

$$v(t) = A \sin 2\pi(f + f_m)t + B \quad (4)$$

위의 식(4)에 따르면 정현파의 주파수는 $f + f_m$ 로 변하게 된다[3]. 이러한 동작은 위상이 시간에 선형적으로 증가하거나 감소해야 한다. 따라서 위상변위기의 동작특성을 이용하여 선형적인 위상변화를 출력할 수 있게 회로를 조작하면 입력되는 신호의 주파수를 조절할 수 있게 된다.

4. 주파수 변환기의 제작과 측정 결과

비교 실험에 사용하기 위해 제작한 RHTL과 LHTL 위상 변위기의 사진을 그림 2에 나타내었다. RHTL 위상 변위기의 경우 FR-4 기판(비유전율 4.35 두께 1.6mm)위에 패드와 전원공급선을 포함한 전체 구조를 만들고 Johanson Technology의 칩 인덕터(8.2nH, 3.9nH)와 Skyworks의 벡터 다이오드 SMV1232-079LF(커패시턴스 범위0.72~4.2pF)을 이용하여 10셀로 제작하였으며, LHTL 위상변위기의 경우 FR-4 기판(비유전율 4.35 두께 1.6mm)로 마이크로스트립 구조의 인덕터와 전체적 구조를 만든 뒤 다이오드 SMV1232-079LF(커패시턴스 범위0.72~4.2pF)을 이용하여 6셀로 제작하였다. 두 구조 모두 1.5GHz - 2.4GHz에서 360° 변환 가능하도록 셀의 수를 정하였으며, 다이오드에 DC 전압을 인가하기 위한 저항은 두 구조 모두 Eleparts의 3.3K Ω 칩 저항을 이용하였다. 제작된 두 위상변위기의 전압에 따른 위상변화는 그림 3, 삽입손실은 그림 4와 같다. 1.5 GHz - 2.4 GHz 범위의 주파수에서 360° 위상 변위가 가변가능하도록 전압조절 범위를 정할 경우 RHTL 위상변위기의 삽입손실은 1.7dB - 7.8dB 사이였고, LHTL 위상변위기는 3.2dB - 6.6dB 였다. 그림 3에서 보듯이 LHTL의 경우 위상변위가 제어전압에 매우 선형적임을 알 수 있는데, 이는 주파수 변환기로 사용시 변환된 주파수의 SFDR을 크게 할 수 있는 특성이 된다.

변조된 주파수 성분을 추출하기 위해 그림 5와 같은 회로를 제작하여 그 출력을 오실로스코프와 스펙트럼 분석기로 측정하였다. 변조된 신호와 그렇지 않은 신호를 믹서에 넣어 입력 주파수 성분을 빼내면, 변조 주파수 성분만 출력으로 나오게 된다. RF Source로는 HP E4421B(입력 4dBm)을 사용하였고 Power Divider 로는 FR-4 기판(비유전율 4.35 두께 1.6mm)을 이용하여 제작한 Wilkinson Power Divider 를 사용하였다. 위상변위기의 삽입손실을 보정해주기 위해 감쇠기로는 Emersion Network의 141-3901-803 3dB 감쇠기를 사용하였다. Mixer는 Mini-Circuits'의 300-2400MHz 믹

서를 사용하였다. 위상변위기의 조정 신호는 DAC(National Instrument SCB-68과 LABVIEW)를 이용하여 톱니파를 인가하였다.

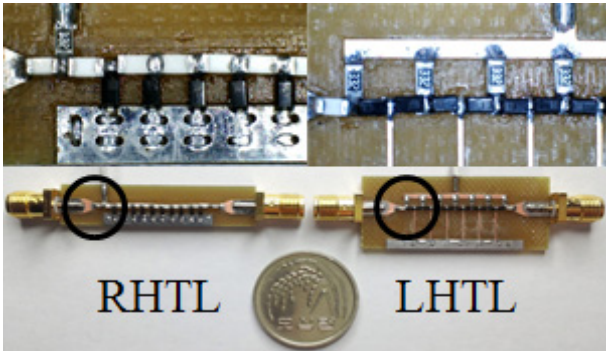


그림 2 완성된 RHTL과 LHTL 위상 변위기 사진.
Fig. 2 The picture of fabricated RHTL (left) and LHTL (right) phase shifters.

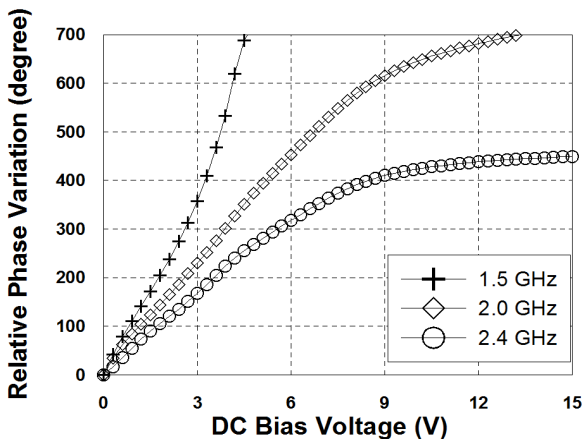
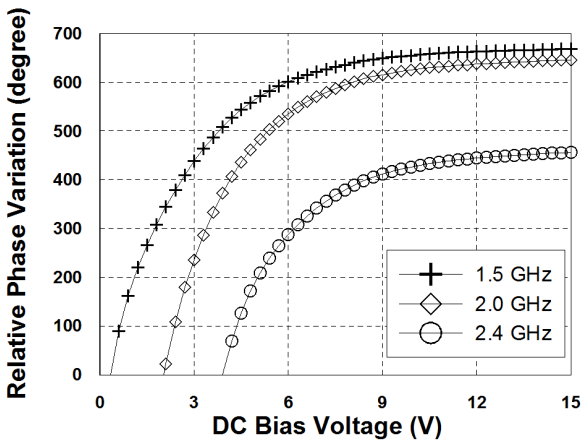


그림 3 완성된 RHTL(위)와 LHTL(아래)위상 변위기의 전압에 따른 상대적 위상 변위
Fig. 3 The measured relative phase variation of the fabricated RHTL (top) and LHTL (bottom) phase shifters with respect to a DC bias voltage.

추출된 변조주파수 성분의 시간영역 신호는 그림 6과 같다. 전압에 따라 위상변이가 인가된 톱니파 신호에 대하여

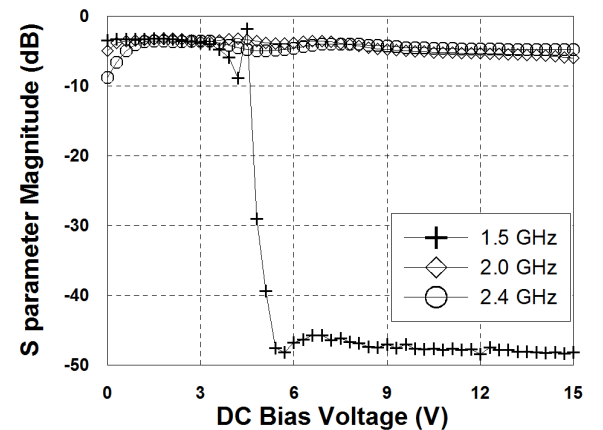
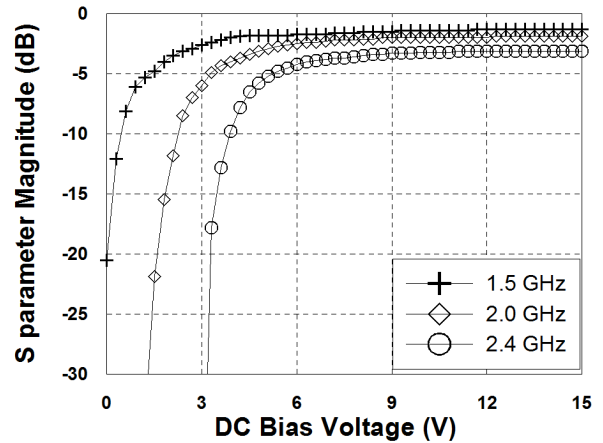


그림 4 완성된 RHTL(위)와 LHTL(아래)위상 변위기의 전압에 따른 삽입 손실
Fig. 4 The measured insertion loss of the fabricated RHTL (top) and LHTL (bottom) phase shifters with respect to a DC bias voltage.

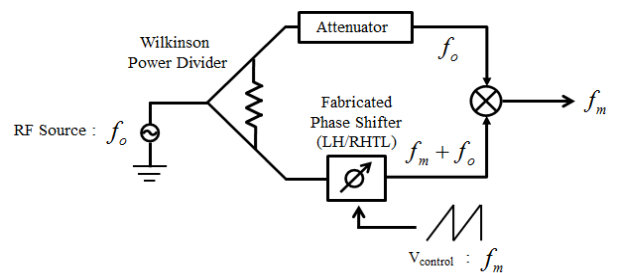


그림 5 변조주파수 성분 출력을 위한 회로도
Fig. 5 The schematic diagram of an extraction circuit to get a modulation frequency (f_m).

선형적인 LHTL 위상변위기를 이용하였을 경우 주파수 변환기 이론과 거의 일치하게 동작하여 변조주파수 성분이 사인파형에 가까운 것에 반해 RHTL 위상변위기를 이용하였을 경우 위상변이가 인가된 톱니파 신호에 대하여 비선형적이기 때문에 파형이 일그러짐을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 Spectrum Analyzer로 SFDR를 측정할 때 변조된 주파수 성분 이외의 성분들이 나오는 정도를 통해서도 확인할 수 있다. 또한 두 파형에서 모두 스파크 잡음과 같은 것이 주

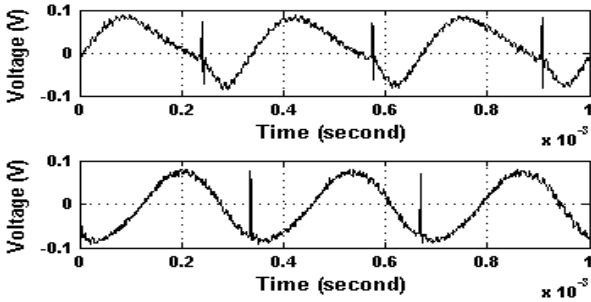


그림 6 추출한 변조 주파수 성분의 시간영역 신호 (위의 RHTL의 결과이며, 아래는 LHTL의 결과이다.)

Fig. 6 The extracted modulation frequency element in time domain. The result of RHTL(top). The result of LHTL (bottom).

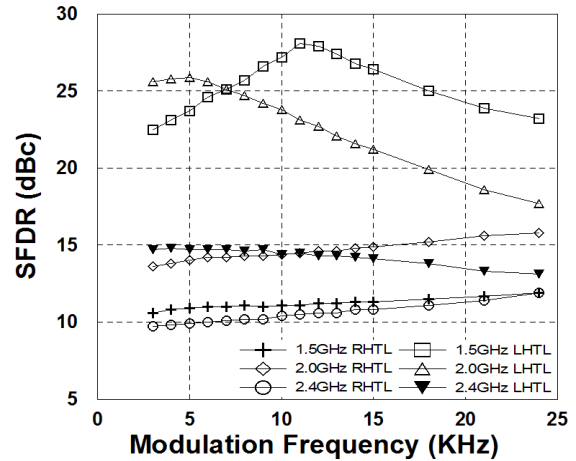


그림 8 변조주파수에 따른 주파수 변환기 출력의 SFDR 측정 결과

Fig. 8 The measured SFDR of the frequency translators with respect to a modulation frequency.

결과를 볼 수 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 LHTL 위상변위기를 이용하였을 경우 주파수 변환기 이론과 거의 일치하게 동작하여 신호 대 잡음비인 SFDR이 RHTL 위상변위기에 비하여 훨씬 좋은 것을 관찰할 수 있다. 그림 8은 변조 신호인 톱니파의 주파수를 바꾸어 가며 SFDR을 측정한 결과이다. 변조 주파수가 높아질수록 SFDR이 나빠지지만, 이는 변조주파수(톱니파)를 만들기 위한 DAC의 성능과도 연관이 있는 것으로 보이며, 주파수가 높아져도 여전히 SFDR 측면에서 LHTL이 좋은 성능을 보여줌을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 광대역이며, 위상변위가 360°이며, 동작 주파수 영역이 광대역 특성을 가지는 위상변위기의 종류 중 한가지인 RHTL 형태와 LHTL 형태의 위상변위기로 주파수 변환기를 만들어 특성을 비교 분석하였다. LHTL 위상변위기로 제작한 주파수 변환기의 경우 조절신호가 톱니파일 때 입력과형에 대해 선형적으로 Phase Delay가 변하는 것을 관찰할 수 있었고 그 결과 주파수 변환된 출력에서 위상변위가 선형적이지 않은 RHTL로 만든 주파수 변환기에 비해 높은 SFDR을 확인할 수 있었다. 따라서, LHTL 위상변위기는 DAC를 이용하여 위상변위기에 복잡한 조절전압을 넣지 않고 아날로그 식으로 톱니파만 인가하더라도 충분히 높은 성능으로 주파수 변환이 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 경북대학교 신임교수정착연구비에 의하여 연구되었음.

References

[1] P. Akkaraekthalin, S. Kee, and D. W. van der Weide, "Distributed broad-band frequency translator and its

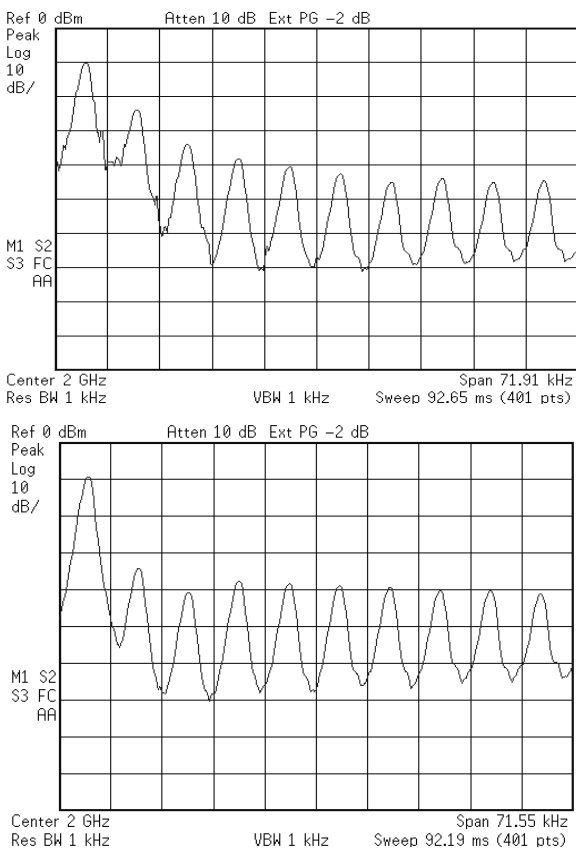


그림 7 주파수 변조된 출력 신호의 스펙트럼 (위 RHTL, 아래 LHTL)이며 입력신호 주파수는 2.0 GHz이고 변조 톱니파의 주파수는 7KHz인 상태의 출력이다.)

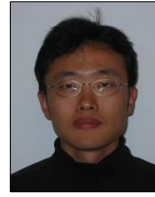
Fig. 7 The spectrum of the output signals of the frequency translators at 2.0 GHz when the modulation frequency is 7KHz. The result of RHTL (top). The result of LHTL (bottom).

기적으로 일어남을 확인할 수 있는데, 이는 DAC 하드웨어의 성능문제로 톱니파의 Falling Time이 좁지 않아 생기는 문제이다.

또한 주파수가 변조된 신호를 위의 회로를 거치지 않고 출력을 바로 스펙트럼 분석기로 관찰해보면 그림 7과 같은

use in a 1-3GHz coherent reflectometer," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 46, no 12, pp. 2244-2250, Dec. 1998

- [2] Brahmachari.A and Paily.R.P. "Low power 2.4 GHz RF transmitter for satellite subsystem using CORDIC based frequency translator," Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 2012 Ninth International Conference on pp. 1 - 5, Sept. 2012
- [3] S. R Mazumder and C. M. Isham, "Performance of a 6 to 18GHz frequency translator utilizing GaAs MMIC 5-bit digital phase shifter." in IEEE Microw. Millimeter-wave Monolith. Circuit Symp. Dig., May 1995, pp. 141-144
- [4] Hongjoon Kim, Alexander B. Kozyrev, Abdolreza Karbassi and D. W. van der Weide, "Linear Tunable Phase Shifter Using a Left-Handed Transmission Line," IEEE Microwave Wireless Comp. Lett. vol. 15, no. 5, May 2005.
- [5] Robert F. Pierret. "Semiconductor Device Fundamentals" Boston, MA. USA.; Addison Wesley, 1996. pp.306
- [6] Hongjoon Kim, Sung-Jin Ho, Min-Ki Choi, Kozyrev, A.B. and Van Der Weide, D.W. "Combined Left- and Right-Handed Tunable Transmission Lines With Tunable Passband and 0° Phase Shift ," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Volume: 54 , Issue: 12 , Part: 1. pp. 4178 - 4184, Dec. 2006



김 홍 준 (金 洪 俊)

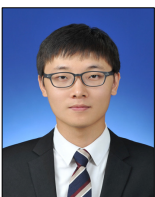
1972년 10월 4일생. 1997년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 University of Southern California 전기공학과 졸업(공학 석사). 2006년 University of Wisconsin-Madison 전기공학과 졸업(공학 박사). 2006.9~2011.2 미국 City University of New York 조교수. 2011.3~현재 경북대학교 전기공학과 부교수
 Tel : 053-950-5601
 Fax : 053-950-6600
 E-mail : hongjoon@knu.ac.kr

저 자 소 개



한 희 제 (韓 希 制)

1987년 7월 31일생. 2013년 신라대학교 전자공학과 졸업(공학 학사). 2013.9~현재 경북대학교 전기공학과 석사과정 재학 중.
 Tel : 053-950-5601
 E-mail : hjhan@knu.ac.kr



박 홍 우 (朴 洪 佑)

1991년 4월 30생. 2010.3~현재 경북대학교 전기공학과 학사과정 재학 중.
 Tel : 053-950-5601
 E-mail : pjw33223@gmail.com