

# 밀리미터파 시스템 적용을 위한 5GHz, 0/180도 능동 위상변환기 설계

박찬규\*, 신동화\*, 이동호\*\*

## 5GHz, 0° / 180° Active Phase Shifter Design for Millimeter-Wave Applications

Chan-Gyu Park\*, Dong-Hwa Sin\*, Dongho, Lee\*\*

### 요 약

밀리미터파 위상배열시스템에 위상변환기는 개별안테나의 위상을 조절하는 핵심 부품이다. 본 논문은 손실이 큰 실리콘 웨이퍼의 위상변환기에 적용을 위한 설계 기법을 5GHz에서 검증한 내용을 담는다. 0/180도 2-State 위상변환기가 제작되었으며 그것은 2개의 2-Stage AMP를 병렬로 구성하였다. 각 State의 Gain을 동일하게 유지하기 위해서 0/180도 Delay 라인을 2-Stage AMP의 각 Stage 중간에 삽입하였다. 통상적으로 AMP를 병렬 연결할 때 Wilkinson Power Combiner/Divider와 같은 수동회로를 추가하지만 실리콘 웨이퍼에서는 이것으로 인해 큰손실이 발생할 수 있으므로 생략하고 직접 연결하였다. 제작결과 5GHz에서 12dB이득, 174도 위상차를 확인하여 본 설계 기법을 검증하였다.

**Key Words** : Phase Shifter, Phased Array, RF Amplifier, Millimeter-Wave Application, Active Switch

### ABSTRACT

A phase shifter is one of the key components that change the phase of an individual antenna in millimeter-wave phased array system. This paper presents a low-loss phase shifter design with two parallel 2-state amplifiers. To get the same gain of 0°/180° each state, delay lines are in the middle of each stage of the 2-Stage amplifiers. Normally, when adding AMPs in parallel, a power combiner/divider such as Wilkinson Power Combiner/Divider is added, but they are directly connected because it can cause added losses in silicon wafer. The measured data shows 12dB gain and 174-degree phase difference at 5GHz.

## I. 서 론

위상변환기는 위상배열시스템(Phased Array System)의 안테나 입력 위상을 조절해서 안테나 빔 방향을 바꾸는 핵심 부품이다[1,2]. 일반적으로 군용 레이더에 사용되던 위상배열시스템의 위상변환기는 고가의 가격에도 불구하고 성능을 최우선해서 저손실 III-V 화합물반도체소자나 MEMS스위치를 중심으로 연구개발이 되었다[3,4]. 하지만, 최근에는 밀리미터웨이브 대역에서 고속 통신시스템이 상용화 되면서 저렴한 실리콘 계열 기관에서의 위상변환기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2,5]. 실리콘 반도체 기관의 큰 손실을

줄이기 위해서 증폭기를 직렬 연결하거나[5], 90도 위상차가 있는 두 개의 이득조정증폭기(VGA)를 병렬 연결해서 위상변환기를 구현하는 Vector-Sum 타입의 위상변환기가 많이 연구되고 있다[6,7]. 특히 Vector-Sum 타입은 기존의 스위치 타입의 수동 위상변환기와 다르게 연속적인 위상조정이 가능하기 때문에 많은 State 빔 조절이 요구되는 시스템에 유리하다. 하지만, 이득조정증폭기(VGA)의 DC 바이어스를 조정하는 별도의 디지털 컨트롤이 요구되며 이득조정증폭기의 이득의 위상을 일정하게 설계해야 하는 어려움이 있다. 본 연구의 최종 목적의 대용량 통신시스템은 4개 정도의 안테나 조절이면 충분하기 때문에 Vector-Sum 타입이 아닌

\* 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지수요관리핵심기술사업 지원을 받아 수행한 연구입니다. (No.20162020108170)

\*\*영남이공대학교 전기자동화과, \*\*영남이공대학교 전기자동화과 (dongho@ync.ac.kr), 교신저자 : 이동호  
접수일자 : 2017년 5월 15일, 수정완료일자 : 2017년 6월 20일, 최종 게재확정일자 : 2017년 6월 22일

기존의 스위치 타입 위상변환기에 AMP를 결합하는 내용을 담는다.

## II. 5GHz AMP

### 1. Single Stage AMP

임의의 능동소자로 Fujitsu사 FHX35LG를 선택하여 설계 및 제작하였다. 설계는 KEYSIGHT사의 ADS를 활용하였으며, 능동소자는 ADS에서 제공하는 모델을 사용하였다. 제작은 0.8mm두께의 FR4기판을 활용하였다. 해당소자는 18GHz까지 이득(Gain)을 얻을 수 있는 HEMT(High Electron Mobility Transistor)로 S21이 큰 편이어서 증폭기의 안정도를 나타내는 K-factor가 작다. 설계시 발진의 위험이 커서 발진 억제를 고려해서 설계하였다.

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|}$$

$$|\Delta| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}|$$

트랜지스터의 DC 바이어스는 Radial Stub를 활용해서 설계하였으며, 5GHz 이하의 저주파 대역 발진억제를 위해 커패시터와 저항을 추가 하였다.

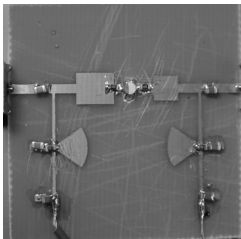


그림 1. Single Stage AMP 제작

측정결과 5GHz에서 8dB 이득(Gain)을 확인하였다. 시뮬레이션과 다르게 1GHz에서 10dB이상의 이득(Gain) 있다. 설계시에 1GHz에서 발진이 염려되어 DC 바이어스 회로에 저항을 연결하여 이것을 억제하려고 하였으나 설계와 다른 결과를 얻었다. 예상과 다르게 저주파에서 이득(Gain)이 커 발진을 염려하였으나 회로가 안정적으로 동작하여 이것을 기본으로 능동 위상변환기를 제작하였다.

### 2. 2-Stage AMP

제작된 Single Stage AMP를 직렬로 2개 연결한 2-Stage AMP를 설계하였다. 1<sup>st</sup> Stage의 Drain 바이어스와 2<sup>nd</sup> Stage의 Gate 바이어스 때문에 DC Block역할을 하는 커패시터를 중간에 삽입하였다. 최종적으로 제작될 0/180도 위상변환기를 위해서 180도 50-Ohm 라인을 삽입하였다.

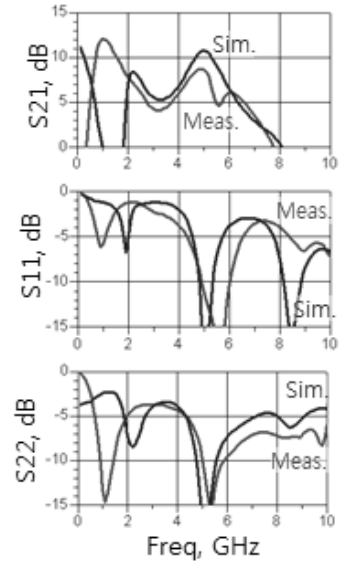


그림 2. 5GHz Single Stage AMP 측정 및 시뮬레이션

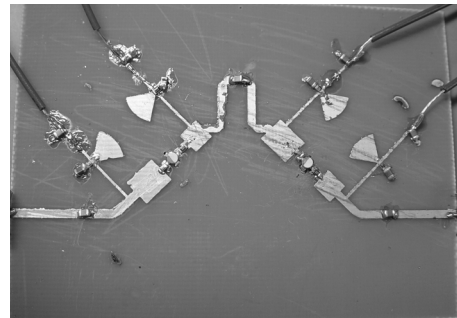


그림 3. 2-Stage AMP 제작

측정결과 5GHz에서 15dB 이득(Gain)을 확인하였다. Single Stage AMP에 비해서 (Gain)은 2배, S11 및 S22는 유사한 결과를 확인할 수 있다.

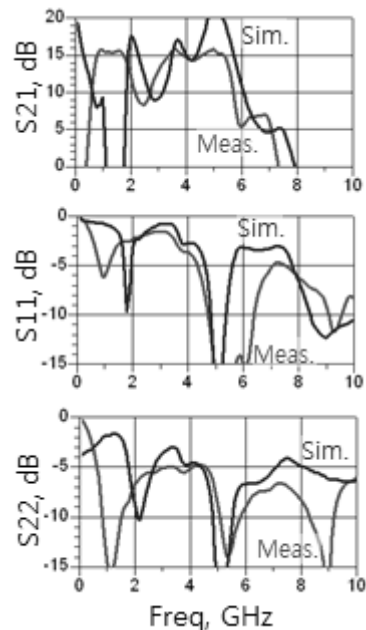


그림 4. 5GHz 2-Stage AMP 측정 및 시뮬레이션

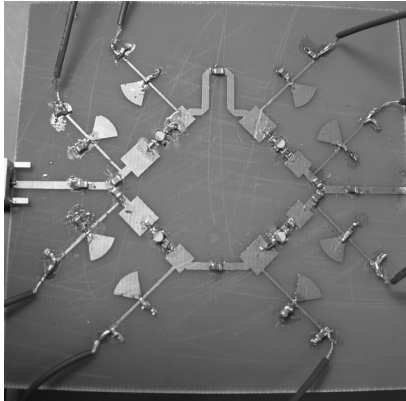


그림 5. 0° / 180° 능동 위상 변환기

### Ⅲ. 5GHz 0° / 180° 능동 위상변환기

#### 1. 능동 위상변환기 설계

2-Stage AMP 두개를 병렬연결해서 0/180도 위상변환기를 제작하였다. 0도는 1<sup>st</sup> Stage와 2<sup>nd</sup> Stage AMP를 Delay 라인 없이 직접 연결하였으며 180도는 50-Ohm 180도 라인을 추가하였다. 일반적인 수동 위상변환기는 0/180도 각각 Delay 라인 양 끝에 SPSP스위치가 삽입되어 스위치가 열리면 OPEN 임피던스가 되어 ON-State에 영향을 주지 않는다. 하지만 본 능동 위상변환기에서는 OFF된 트랜지스터의 입력 매칭회로가 병렬 연결된 AMP에 영향을 주어 이득이 저하되는 결과를 가져온다. 본 회로는 CMOS회로와 같이 손실이 큰 소자의 사용을 가정하고 있기 때문에 수동 스위치 추가 삽입으로 이득이 저하되는 것이나 수동 스위치를 사용하지 않고 AMP의 이득이 감소하는 것은 유사하다고 판단해서 스위치의 삽입 없는 간단한 회로를 선택하였다. 또한 통상적으로 AMP를 병렬 연결할 때 Wilkinson Power Divider/Combiner와 같이 격리도(Isolation) 확보가 가능한 Power Divider/Combiner를 사용하게 된다. 하지만 이것은 긴 라인이 요구되어 추가 손실의 원인이 되므로 사용하지 않았다.

0/180도 각 State의 Delay Line는 2-Stage AMP의 각 State 중간에 위치하였다. 2-Stage AMP의 앞(입력) 또는 뒤(출력)에 위치한다면, 0/180도 각 State의 입출력 임피던스가 다르게 되어 이득이 다르게 되므로 이것을 방지하기 위해서이다.

[그림 6] 은 제작된 위상변환기의 0도, 180도를 각각 ON 하였을 때 측정결과를 보여준다. 예상대로 OFF된 State가 입력 및 출력 임피던스에 영향을 주기 때문에 S11 및 S22가 단일 AMP측정 결과에 비해 상승하였다. 하지만 8~10dB로 비교적 양호한 것으로 볼 수 있다. 또한 예상대로 0/180도 각 State의 이득(Gain)이 동일하게 유지되었다.

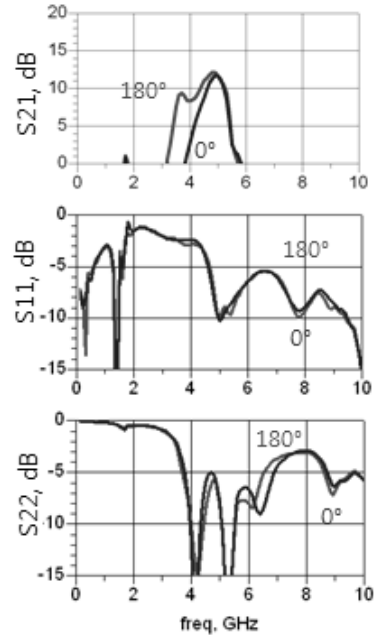
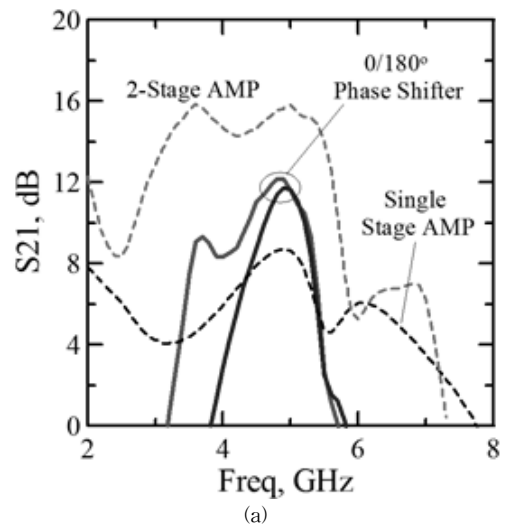


그림 6. 0° / 180° 능동 위상 변환기 측정결과

#### 2. 0° / 180° 능동 위상변환기 특성 분석

수동스위치 대신한 AMP는 스위치 역할과 동시에 이득(Gain)을 준다. 큰 이득(Gain)을 얻으면서 OFF된 State가 ON-State에 영향을 균등하게 주기 위해 0도 180도 라인이 각각 중간에 삽입된 2-State AMP를 활용하였다.

[그림 7(a)]는 각 AMP와 위상변환기의 이득을 비교한 것이다. Single Stage AMP에 비해 2-Stage AMP는 2배 이득을 얻었지만, Phase Shifter를 구현하였을 때는 약 1.5배의 이득을 얻었다. 이러한 결과는 3.1장에서 언급한바와 같이 OFF되었을 때 OPEN 임피던스를 갖는 SPSP스위치를 대신해서 AMP를 활용했기 때문에 나타나는 결과이다. 각 State의 위상차는 약 180°를 유지하고 있다. 4개의 동일한 증폭기로 구성된 본 능동위상변환기는 개별 증폭기의 S21 위상이 동일하므로 Switched Line Type의 일반 수동 위상변환기와 유사한 대역폭을 갖는다.



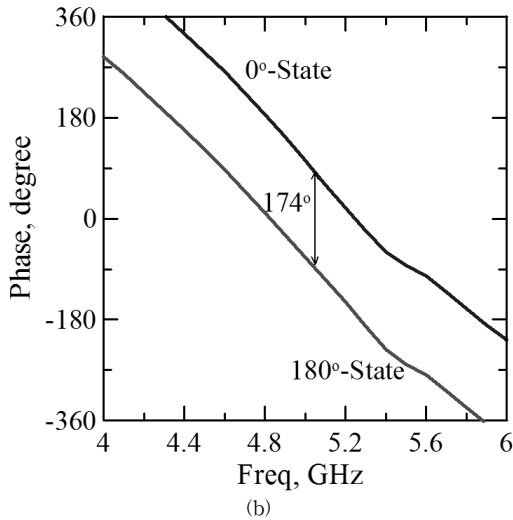


그림 7. AMP, 능동위상변환기 측정 이득비교(a) 및 능동위상 변환기의 각 State별 측정 위상

#### IV. 결론

CMOS와 같이 손실이 큰 웨이퍼 사용을 고려한 능동 위상변환기를 설계하였다. 일반적인 수동 스위치를 대신해서 AMP를 활용하였다. 각 State의 이득에 차이를 줄이기 위해서 2-Stage AMP의 중간에 Delay라인을 삽입하였다. 손실과 함께 면적이 커질 수 있는 Wilkinson Power Divider/Combiner와 같은 격리도(Isolation)이 있는 Power Divider/Combiner를 사용하지 않고 각 State를 직접 연결하였다. 이러한 설계 검증을 위해 5GHz 위상변환기를 제작하였으며 12dB이득, 174도 위상차를 획득하였다.

#### 참고 문헌

[1] Nitsche, Thomas, et al. "Steering with eyes closed: mm-wave beam steering without in-band measurement." Computer Communications (INFOCOM), 2015 IEEE Conference on. IEEE, 2015.

[2] Koh, Kwang-Jin, and Gabriel M. Rebeiz. "0.13-um CMOS phase shifters for X-, Ku-, and K-band phased arrays." IEEE Journal of Solid-State Circuits 42.11 (2007): 2535-2546.

[3] Tan, Guan-Leng, et al. "Low-loss 2-and 4-bit TTD MEMS phase shifters based on SP4T switches." IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques 51.1 (2003): 297-304.

[4] Pillans, B., et al. "Ka-band RF MEMS phase shifters." IEEE Microwave and Guided Wave Letters 9.12 (1999): 520-522.

[5] Patterson, Chad E., et al. "A lightweight organic X-band active receiving phased array with integrated SiGe amplifiers and phase shifters." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 59.1 (2011): 100-109.

[6] Chua, Marcial, and Ken W. Martin. "1 GHz programmable analog phase shifter for adaptive antennas." Custom Integrated Circuits Conference, 1998. Proceedings of the IEEE 1998. IEEE, 1998.

[7] Kim, S. J., and N. H. Myung. "A new active phase shifter using a vector sum method." IEEE microwave and guided wave letters 10.6 (2000): 233-235.

#### 저자

##### 박 찬 규(Chan-Gyu Park)



- 1987년 : 경일대학교 전기공학과 공학 학사 졸업
- 1991년 : 영남대학교 대학원 전기공학과 공학석사 졸업
- 2000년 : 영남대학교 대학원 전기공학과 공학박사 졸업
- 1995년~현재 : 영남이공대학교 전기자동화과 교수
- <관심분야> : 공장자동화, 전파공학

##### 신 동 화(Dong-Hwa Sin)



- 1994년 : 경일대학교 전기공학과 공학 학사 졸업
- 1998년 : 영남대학교 대학원 전기공학과 공학석사 졸업
- 2016년 : 영남대학교 대학원 전기공학과 공학박사 수료
- 2013년~현재 : 영남이공대학교 전기자동화과 교수
- <관심분야> : 고전압, 방전, 전파공학

##### 이 동 호(Dongho, Lee)



- 2004년 : 고려대학교 전기전자전파 공학학사 졸업
- 2014년 : 고려대학교 대학원 전자전기 공학 박사 졸업
- 2011년 5월~2016.2월 : 한국에너지기술연구원 PM
- 2016년 3월~현재 : 영남이공대학교 전기자동화과 교수
- <주 관심분야> : 전파공학, 무선전력전송, 전력계통