

# Vector Sum 방법을 이용한 새로운 구조의 능동 위상천이기

## A New Active Phase Shifter using Vector Sum Method

김성재 · 명노훈

Sung-Jae Kim · Noh-Hoon Myung

### 요 약

본 논문에서는 Vector Sum 방법을 이용한 새로운 구조의 능동 위상천이기를 제안하였고 그 위상천이기를 제어할 독특한 디지털 방식의 위상 제어 방법을 제시하였다. 제안한 새로운 구조의 능동 위상천이기는 Wilkinson power combiner/divider, branch line 3 dB quadrature hybrid coupler, 그리고 dual gate FET(DGFET)를 사용한 가변 이득 증폭기(VGA)를 이용하여 설계·제작하였다. 그리고 제작된 능동 위상천이기를 디지털 방식으로 동작시킴으로써 제안된 구조가 효율적으로 잘 동작하고 또한 제시된 디지털 방식으로 제어하는 방법이 타당함을 보였다.

### Abstract

In this paper, a new active phase shifter is proposed using a vector sum method, and a unique digital phase control method of the circuit is suggested. The proposed scheme was designed and implemented using a Wilkinson power combiner/divider, a branch line 3 dB quadrature hybrid coupler and variable gain amplifiers (VGAs) using dual gate FETs (DGFETs). Furthermore, it was also shown that the proposed scheme is more efficient and works properly with the digital phase control method.

### I. 서 론

능동 위상천이기는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 그 중 하나는 DGFET 자체의 특성을 이용한 것으로 gate의 bias전압을 조정함으로써 RF 신호의 위상을 조절하는 방법이다<sup>[1]</sup>. 이 방법은 조절할 수 있는 위상의 범위가 크지 않고 또한 위상 변화에 따른 이득의 변화가 커서 실제 시스템에 사용하기에는 여러 가지 문제점이 있다. 또 다른 방법은 vector sum 방법을 이용한 위상천이기이다<sup>[3]-[5]</sup>. 이 방법은 입력 RF신호를 일정한 위상차가 있는 몇 개의 신호로 나누는 후 각각의 신호의 크기를 VGA를 통해 적절히 조절하여 동위상으로 더하면 출력 신호의 위상뿐 아

니라 크기도 조절할 수 있게 된다. 여기서 VGA는 대개 DGFET를 이용하여 구현하는데, 최근에는 single gate FET를 사용한 방법도 제안되었다<sup>[6]</sup>. 이런 vector sum 방법을 이용한 위상천이기는 첫 번째 방법과는 달리 위상을 360° 변화시킬 수 있고, 또한 이득을 일정하게 유지시키거나 원하는 만큼 변화시킬 수 있어 배열 안테나의 빔을 자유로이 조절할 수 있다.

그러나 기존의 vector sum 방법을 이용한 능동 위상천이기는 수동소자를 많이 사용하는 구조적인 문제로 인해서 전력 손실이 크고 사용되는 VGA를 효과적으로 이용하지 못하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 효과적으로 극복하는 vector

한국과학기술원 전기 및 전자공학과(Dept. of Electrical Engineering, KAIST, Electromagnetic Theory & Technology Lab.)

· 논문 번호 : 991227-121

· 수정완료일자 : 2000년 2월 11일

sum 방법을 이용한 새로운 구조의 능동 위상천이기를 제안하고 제안된 구조의 능동 위상천이기를 설계 제작하였다. 그리고 제작된 능동 위상천이기를 디지털 방식으로 동작시킴으로써 제안된 구조가 효과적으로 잘 동작하고 또한 제시된 디지털 방식으로 제어하는 방법이 타당함을 보였다.

### II. 새로운 구조의 능동 위상천이기

본 논문에서 제안한 새로운 구조의 능동 위상천이기의 block diagram을 그림 1에 보였다. 그림 1에서 괄호 안의 숫자는 신호의 크기를 나타내고 각각의 VGA에 적힌 a, b, A, B는 각 VGA의 가변 이득을 나타낸다. 또 그림 1(b)(c)의 vector diagram은 각각의 표시된 부분에서 신호의 크기와 위상을 나타낸 것이다. 그림 1(a)에서  $2\sqrt{2}$ 의 크기를 가지는 입력 신호를 전력 분배기에 의해 크기가 2인 동위상의

두 신호로 나눈다. 이 두 신호를 첫 번째 단의 VGA에 의해 각각의 신호를 a, b만큼 증폭시킨 후 hybrid coupler에 통과시키면 그림 1(b)에서 vector diagram의 1, 2와 같이 표시된다. 여기서 2번 신호를  $180^\circ$  만큼 위상을 변화시킨 후 1번 신호와 함께 두 번째 단의 VGA로 A, B만큼 증폭시켜 동위상으로 더하면 그림 1(c)에서 vector diagram의 'output'과 같은 크기와 위상을 가지는 출력 신호를 얻을 수 있다.

그림 1(c)를 보면 'output'은 신호 3, 4의 합이고 또 신호 3, 4는 각 축에서 Aa, Ab, Ba, Bb의 크기를 가지는 신호의 합으로 표현된다. 결국 VGA의 이득을 조정하면 각 축상에 나타나는 신호의 크기를 조정할 수 있으므로 'output'의 크기와 위상을 제어할 수 있게 된다. 또 각 사분면이 그림 1(c)에 괄호로 표시한 바와 같이 네 개의 VGA의 이득에 해당한다고 생각하면 각 축에 나타나는 신호의 크기는 서로 인접한 사분면에 해당하는 VGA들의 이득 곱으로

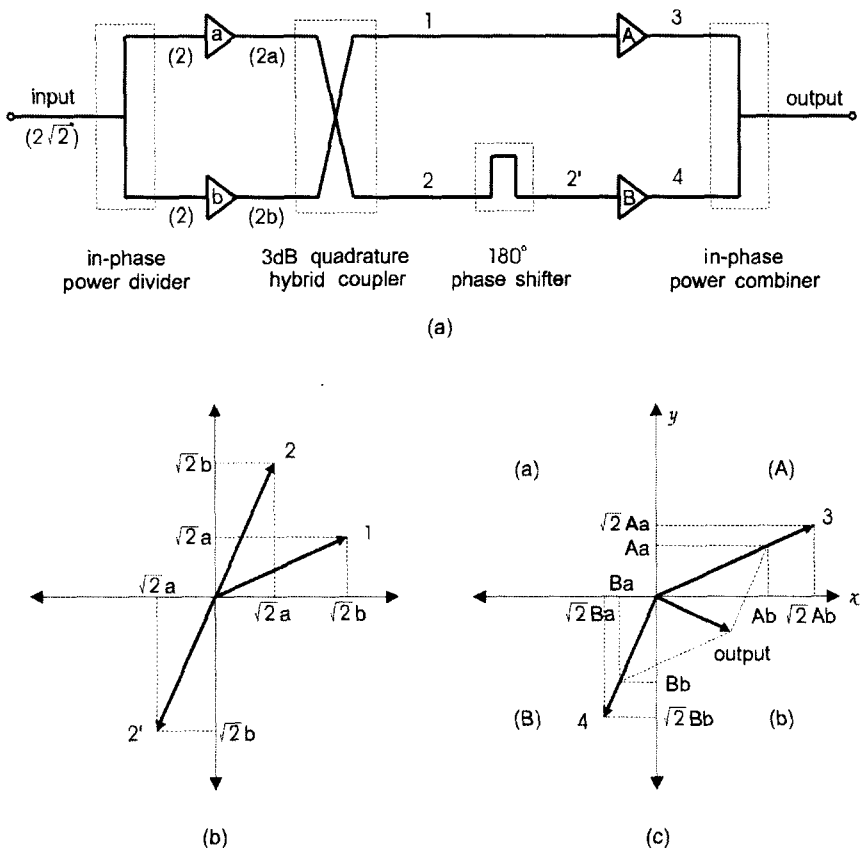


그림 1. (a) 새로운 능동 위상천이기의 구조와 (b), (c) vector diagram

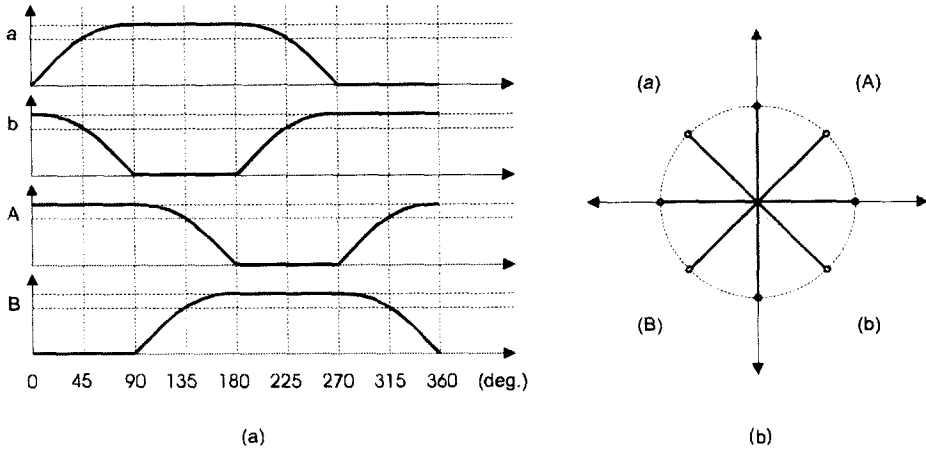


그림 2. (a) 출력 신호의 위상에 따른 각 VGA의 이득 변화(linear scale),  
(b) 3-bit 위상천이기 동작시의 vector diagram

표현되는 것을 볼 수 있다. 따라서 일정한 크기의 출력 신호를 가지며 위상만을 제어하기 위해서는 네 개의 VGA의 이득을 그림 2(a)와 같이 조정한다.

그림 2(a)에 보인 바와 같이 각각의 위상 상태에서 세 개의 VGA가 이득이 있고 나머지 하나의 이득이 0임을 볼 수 있다. 그런데 기존의 구조에서는 단지 두 개의 VGA만 이득을 가지는 상태이므로 제안한 구조의 능동 위상천이기는 상대적으로 전력이나 이득면에서 효율적임을 알 수 있다. 그리고 그림 1(a)를 보면 신호는 전력 분배기, 3dB hybrid coupler 그리고 전력 혼합기를 통과하게 되므로 제안한 구조의 능동 위상천이기는 구조적으로 9dB의 전력 손실을 가지게 된다. 이것은 기존의 어떤 구조보다 상대적으로 적은 전력 손실이고, 또한 사용된 수동소자의 갯수면에서도 기존의 구조보다 적게 사용되었다. 이 때문에 수동소자에 의한 전력손실도 더 작고 또한 전체 크기도 작다. 따라서 제안한 구조의 능동 위상천이기는 크기, 전력, 사용된 소자의 갯수 그리고 이득 면에서 기존의 구조보다 훨씬 효율적인 장점이 있다.

### III. 독특한 디지털 방식의 위상 제어 방법

제안한 구조의 능동 위상천이기를 실제 제작하여 동작시키려면 VGA는 여러가지 제약 조건을 가지게 된다. 대표적으로는 VGA의 입력출력 정합 문제와

VGA의 여러 이득 상태에서 이득의 위상이 변하지 않아야 하는 점을 들 수 있다. 이러한 제약 조건을 완화시키는 한가지 방법으로 위상천이기를 디지털 방식으로 동작시키는 것을 생각할 수 있는데, VGA의 몇 가지 이득 상태에서만 제약 조건을 만족시키면 된다. 그림 2(b)는 3-bit 위상천이기의 각각의 위상 상태를 나타낸 것이고 그림 2(a)는 각각의 위상 상태를 얻기 위한 각 VGA의 이득 상태를 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 3-bit 위상천이기를 만들기 위해서는 각 VGA마다 최소한 세 가지 이득 상태가 필요하다. 그러나 8가지 위상 상태에 비해 네 개의 VGA에 세 가지 이득 상태는 너무 많은데, 이것은 네 개의 VGA에 세 가지 이득 상태의 조합은 81가지이기 때문이다.

이제 네 개의 VGA에 두 가지 이득 상태만의 조합으로 8가지 위상 상태를 얻을 수 있다고 가정하자. 우선 각각의 VGA는 두 가지 이득 상태만 가지므로 각 단의 VGA의 이득 사이에는 서로 같거나 어느 한 쪽이 큰 경우 뿐이다. 따라서 각 단의 이득 a와 b, A와 B 사이에는 각각 세 가지 경우가 있을 수 있고 이들의 조합은 9가지가 된다. 이를 정리하면 표 1과 같다. 여기서 x와 y는 그림 1(c)의 vector diagram에서 x축과 y축에 해당하는 신호의 크기를 나타낸 것으로  $x = Ab - Ba$ ,  $y = Aa - Bb$ 이다. 표 1에 나타난 바와 같이 두 가지 이득 상태만으로 3-bit 위상 제어가 가능함을 알 수 있다. 그리

표 1. 9가지 경우의 이득 상태에 따른 출력 신호의 크기와 위상

		$A=B$ ( $M$ or $kM$ )	$A=kB$ $B=M$	$A=B$ $A=M$
$a=b$ ( $M$ or $kM$ )	$x$	$Aa - Aa = 0$	$aB(k-1)$	$aA(k-1)$
	$y$	$Aa - Aa = 0$	$aB(k-1)$	$aA(k-1)$
	Phase	No Output	$-135^\circ$	$45^\circ$
	Magnitude	0	$aB(k-1)\sqrt{2}$ $aB=(M^2 \text{ or } kM^2)$	$aA(k-1)\sqrt{2}$ $aA=(M^2 \text{ or } kM^2)$
$a=kb$ $b=M$	$x$	$bA(1-k)$	$bB(k-k)=0$	$bA(1-k^2)$
	$y$	$bA(k-1)$	$bB(k^2-1)$	$bA(k-k)=0$
	Phase	$-45^\circ$	$-90^\circ$	$0^\circ$
	Magnitude	$bA(1-k)\sqrt{2}$ $bA=(m^2 \text{ or } kM^2)$	$M^2(1-k^2)$	$M^2(1-k^2)$
$a=b$ $a=M$	$x$	$aA(1-k)$	$aB(k^2-1)$	$aA(k-k)=0$
	$y$	$aA(k-1)$	$aB(k-k)=0$	$aA(1-k^2)$
	Phase	$135^\circ$	$-180^\circ$	$90^\circ$
	Magnitude	$aA(1-k)\sqrt{2}$ $aA=(M^2 \text{ or } kM^2)$	$M^2(1-k^2)$	$M^2(1-k^2)$

$(0 < k < 1)$

고 출력 신호의 크기를 같게 하려면 다음 두 식 중 하나를 만족시켜야 하는 것도 알 수 있다.

$$M^2(1-k)\sqrt{2} = M^2(1-k^2), \quad (0 < k < 1) \quad (1)$$

$$M^2(1-k)\sqrt{2} = kM^2(1-k^2), \quad (0 < k < 1) \quad (2)$$

위 식을 풀면 식 (1)만이  $k=\sqrt{2}-1$ 의 근을 가진다. 따라서 각 VGA가 7.66 dB ( $-20 \log(\sqrt{2}-1)$ )의 차이가 있는 두 이득 상태를 가지면 3-bit 위상

제어가 가능하다. 이상의 결과를 출력 신호의 위상 변화에 따라 각 VGA의 이득으로 정리하면 표 2와 같다.

표 2를 보면 위상 변화에 따라 작은 이득 상태가 순환하듯이 보인다. 이것은 그림 3의 두 vector diagram을 보면 당연하다는 것을 알 수 있다. 각각의 vector diagram은  $-45^\circ$ 와  $0^\circ$ 를 나타낸 것이다. 이 두 상태가  $90^\circ$ 씩 돌아가면 3-bit 위상 제어를 할 수 있고 그렇게 하려면 작은 이득 상태가 순환해야 함을 알 수 있다. 따라서 이득이  $A, a, B, b$ 인 VGA

표 2. 출력 신호의 위상 변화에 따른 VGA의 이득 변화

	$-135^\circ$	$-90^\circ$	$-45^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$	$180^\circ$	
$A$	$m$	$m$	$M$	$M$	$M$	$M$	$M$	$m$	VGA1
$a$	$M$	$m$	$m$	$m$	$M$	$M$	$M$	$M$	VGA2
$B$	$M$	$M$	$M$	$m$	$m$	$m$	$M$	$M$	VGA3
$b$	$M$	$M$	$M$	$M$	$M$	$m$	$m$	$m$	VGA4
	[1]	[1,2]	[2]	[2,3]	[3]	[3,4]	[4]	[4,1]	

$m=(\sqrt{2}-1)M$

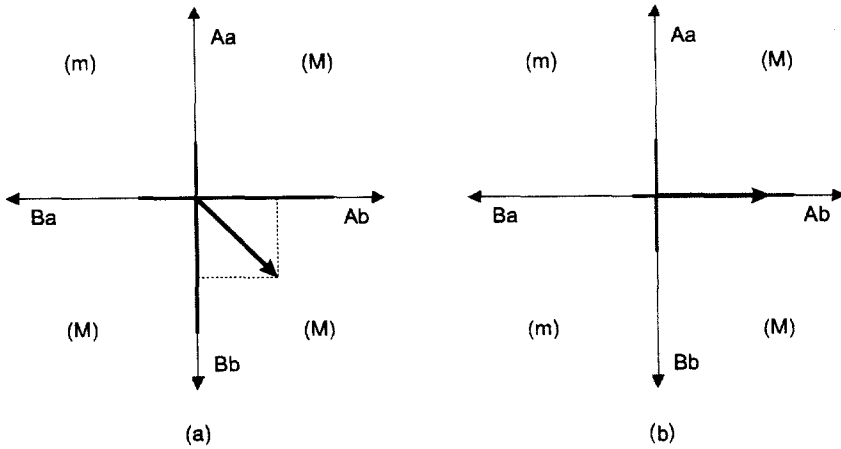


그림 3. (a)  $-45^\circ$ , (b)  $0^\circ$ 에서의 vector diagram

를 각각 VGA1, VGA2, VGA3 그리고 VGA4라 하고 위상 변화에 따른 각 VGA의 제어 상태를 표 2의 가장 아래 행과 같이 나타내기로 한다.

그리고 그림 3을 다시 살펴보면 그림 2(a)에서와 같이 아날로그로 위상을 제어할 때보다 이득에서 손해를 보는 것을 볼 수 있다. 여기서의 손실은 1.6 dB ( $1-k^2$ )이다. 또한 각 VGA의 이득 상태는 두 가지이지만 실제 vector diagram의 축 상에 나타나는 이득 상태는 세 가지인 것도 볼 수 있다. 이것은 각 축에 나타나는 이득은 서로 인접한 사분면에 해당하는 VGA의 이득의 곱으로 이루어졌기 때문이다. 따라서 제시된 디지털 방식의 위상 제어 방법은 제안된 구조의 능동 위상천이기에서만만의 독특한 방법이라고 할 수 있다.

#### IV. 제작 및 결과

제안한 새로운 구조의 능동 위상천이기를 제작하기 위해서는 여러가지 수동소자와 VGA가 필요하다. 동위상 전력 혼합기/분배기로는 Wilkinson power combiner/divider를 사용하였고 3dB quadrature hybrid coupler로는 branch line 3dB quadrature hybrid coupler를 사용하였으며  $180^\circ$  위상천이기로는 delay line을 이용하였다. 그림 4는 제작된 마이크로 스트립 패턴을 나타낸다.

그림 5는 제작된 새로운 구조의 능동 위상천이기의 예상 결과와 측정 결과로 VGA 이득의 제어 상태에 따른 중심 주파수에서의 위상변화를 나타낸다. 예상 결과와 측정 결과사이의 위상 오차는  $\pm 7^\circ$  이

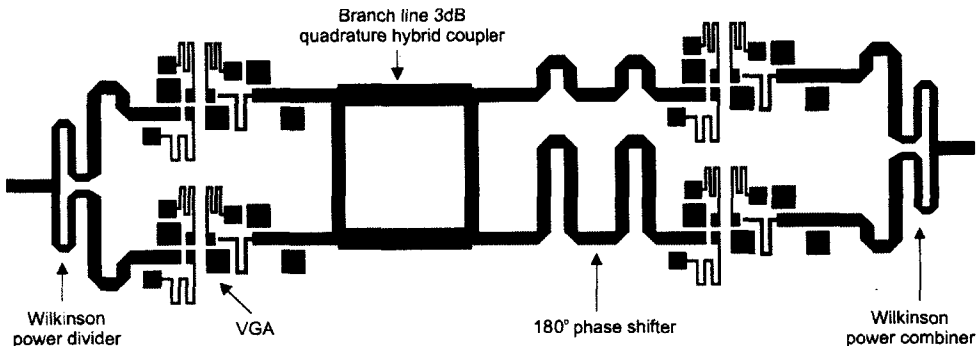


그림 4. 제작된 능동 위상천이기의 패턴

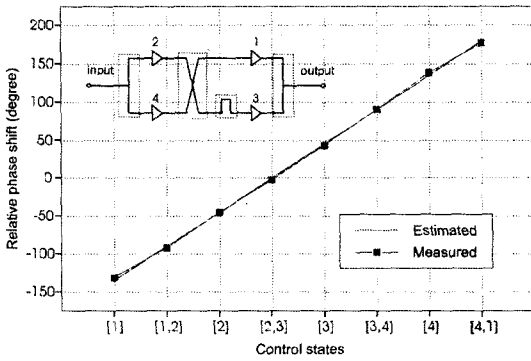


그림 5. 중심주파수에서 제어 상태에 따른 능동 위상 천이기의 위상 변화

내로 두 결과가 서로 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 여기서의 위상 오차는 VGA의 위상 차이와 수동 소자들과 VGA의 불완전한 정합때문인 것으로 여겨진다. 그림 6(a)는 DGFET를 이용하여 제작한 VGA의 두 가지 이득 상태에서의 이득의 크기를 나타낸 것이다. 앞서 보인 바와 같이 두 이득의 크기의 차이는 중심 주파수에서 약 7.6dB이고 두 이득 상태에서의 전달 위상의 차이는 약 6°이다.

그림 6(b)는 여러 가지 제어 상태에서의 능동 위상천이기의 이득을 나타낸 것이다. 주의하여 볼 것은 그림 6(a)에서 큰 이득 상태에서의 이득이 11.5 dB이고 전체 능동 위상천이기의 중심 주파수에서 평균 이득은 11.5 dB이라는 점이다. 이로부터 제안된 능동 위상천이기가 기존의 vector sum 방법을 이

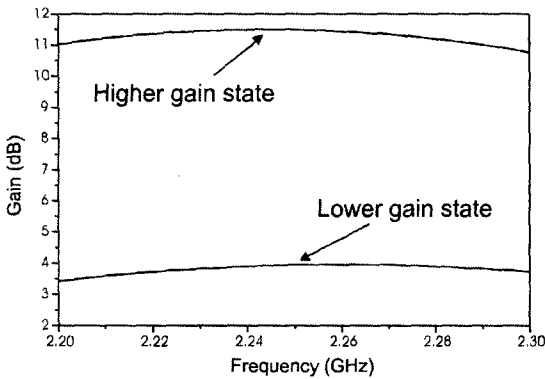
용한 능동 위상천이기보다 더 효율적임을 알 수 있다. 전체 능동 위상천이기의 이득 변화는  $\pm 0.5$  dB이다.

### V. 결 론

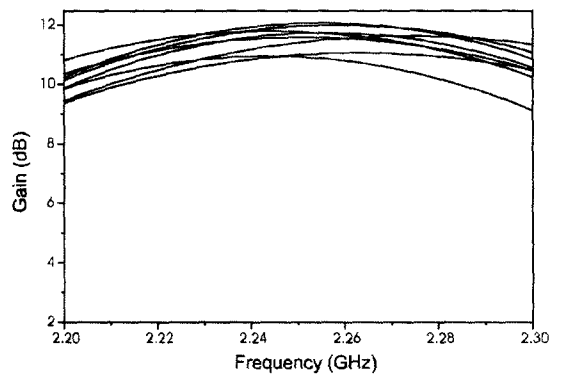
본 논문에서는 vector sum 방법을 이용한 새로운 구조의 능동 위상천이기를 제안하였다. 그리고 제안한 구조의 능동 위상천이기는 기존의 vector sum 방법을 이용한 능동 위상천이기보다 크기 또는 소자수나 전력 손실면에서 더 효율적임을 보였다. 그리고 제안된 구조에서 간단한 디지털 방식의 독특한 위상 제어 방법을 제시하였다.

이를 바탕으로 Wilkinson combiner와 branch line 3dB hybrid coupler, 그리고 DGFET를 이용한 VGA를 설계·제작하여 새로운 구조의 능동 위상천이기를 제작하였다. 그리고 제작된 능동 위상천이기는 제시한 디지털 방식으로 동작시켰으며 11.5 dB의 이득을 가지면서 위상을 0°에서 360°까지 변화시킬 수 있었다. 이 때 이득의 변화는  $\pm 0.5$  dB였다.

본 논문에서 설계·제작된 능동 위상천이기는 기존의 Hybrid형 위상천이기에 비하여 MMIC에 적용이 용이한 장점을 가지므로 증폭기와 위상천이기가 분리된 기존의 위상 배열 안테나 시스템에서 증폭기와 위상천이기를 대체할 수 있는 집적된 형태의 하나의 소자로 사용될 수 있다. 그러나 실제 능동 위상 배열 안테나에 적용하기 위해서는 잡음 성능에 대한



(a)



(b)

그림 6. (a) VGA의 두 가지 이득 상태에서의 이득  
(b) 제어 상태에 따른 능동 위상천이기의 이득

연구가 필요하다. 또한 제안된 능동 위상천이기는 근본적으로 위상과 크기를 연속적으로 제어할 수 있으므로 적응 배열 안테나 시스템에서 효과적으로 사용될 수 있다.

### 참 고 문 헌

[1] C. Tsironis and P. Harrop, "Dual-Gate GaAs MESFET Phase Shifter with Gain at 12 GHz", *Electronics Letters*, vol. 16, no. 14, July, 1980, pp. 553-554.

[2] M. Kumar and H. C. Huang, "Dual Gate MESFET variable-gain, constant-output power amplifier", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-29, 1981, pp. 185-189.

[3] M. Kumar, R. J. Menna and H. Huang,

"Broad-Band Active Phase Shifters Using Dual Gate MESFET", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-29, 1981, pp. 1098-1101.

[4] Y. Gazit and H. C. Johnson, "A continuously-variable Ku-band phase/amplitude module", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 1981, pp. 436-438.

[5] John R. Selin, "Continuously Variable L-Band Monolithic GaAs Phase Shifter", *Microwave J.*, vol. 30, September, 1987, pp. 211-218.

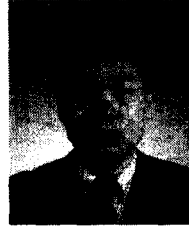
[6] D. K. Paul and P. Gardner, "Microwave Quadrature Active Phase Shifter using MESFETs", *Microwave and Optical Tech. Lett.*, vol. 15, 1997, pp. 359-360.

### 김 성 재



1996년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학(공학사)  
 1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학(공학석사)  
 1998년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 박사과정  
 [주 관심분야] 위성 및 이동통신, 안테나 및 레이다

### 명 노 훈



1976년 2월: 서울대학교 공과대학 전기공학과(공학사)  
 1982년 12월: The Ohio State Univ. E.E. Dept.(공학석사)  
 1986년 8월: The Ohio State Univ. E.E. Dept.(공학박사)  
 1979년 3월~1980년 8월: 삼성전자

(주) 컴퓨터 개발실  
 1981년 4월~1986년 8월: ElectroScience Lab.  
 1982년 1월~1983년 12월: 미국 교통안전연구소(NHTSA)  
 1986년 9월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수  
 [주 관심분야] 위성 및 이동통신, 전파전파 산란해석, 마이크로파공학, EMI/EMC/EMS 등