

主題

# 결합발진기를 이용한 능동위상배열 안테나 기술 최근 동향 (Recent Technology on Active Phased Array Antennas using Coupled Oscillators)

한국과학기술원 명 노 훈

차 례

- I. 서론
- II. 결합발진기배열 안테나의 기본 원리
- III. 결합발진기배열 안테나의 기술 동향
- IV. 결론

## 요 약

위상배열 안테나 시스템에서 빔 제어 기술은 이동통신 및 위성통신시스템, 비행하고 있는 임의의 비행체의 위치를 고도의 정확도를 가지고 추적하는 군사용 레이더 시스템이나 항공사의 통신 시스템, 선박이나 차량간의 충돌을 방지하기 위한 충돌방지 시스템 등에서 널리 사용되고 있다. 이러한 위상배열 안테나 시스템에서 위상천이기를 이용하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 원리적으로 간단하지만 실제 구현할 때 위상천이기를 제어하기 위한 제어 신호와 DC 바이어스 라인들 그리고 전력분배기로 구성되어 있기 때문에 전체 회로가 복잡해진다. 뿐만 아니라 현재로서는 위상천이기의 가격과 삽입 손실 때문에 저렴하고 높은 이득을 갖는 위상

배열 안테나 시스템을 구현하기가 힘들다. 본 논문에서는 위상천이기를 사용하지 않고 발진기들의 결합을 이용함으로써 이와 같은 단점을 극복하면서 배열 안테나의 복사 빔을 제어할 수 있는 결합발진기 배열 안테나의 최근 기술동향을 분석하고 여러 기술들의 장단점을 기술한다.

## I. 서론

근래에 들어 우리나라는 물론 세계적으로 개인휴대통신 등을 포함한 정보통신의 폭발적인 신장은 앞으로도 계속 지속될 것으로 예상되고 있으며, 새로운 형태의 통신 서비스와 그 품질의 향상 그리고 새로운 주파수 대역의 개척이 중요 과제로 대두되고 있다. 한편, 통신의 품질 향상을 위해서 그리고 언제

이더서나 원하는 서비스를 받기 위해서는 새로운 형태의 안테나의 연구개발이 뒤따라야 한다. 이에 대한 해결책의 하나로 위상배열 안테나의 채택이 신중히 검토되고 있다. 현재 위상배열 안테나 시스템에서 빔 제어 기술은 이동통신 및 위성통신시스템, 비행하고 있는 임의의 비행체의 위치를 고도의 정확도를 가지고 추적하는 군사용 레이더 시스템이나 항공사의 통신 시스템, 선박이나 차량간의 충돌을 방지하기 위한 충돌방지 시스템에서는 센서기술, 추적기술 등에서 필요로 하고 있는 매우 중요한 핵심 기술이다. 이러한 위상배열 안테나에 있어서의 빔 제어 기술은 위상천이기를 이용하여 각각의 배열 소자에 급전되는 위상을 제어하는 방법, 주파수를 변화시켜서 위상을 제어하는 방법, 진행파를 이용하는 방법 등이 있다.

이러한 여러 가지 방법 중에 (그림 1)에 나타난 위상천이기를 이용하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 원리적으로 간단하지만 실제 구현할 때 위상천이기를 제어하기 위한 제어 신호와 DC 바이어스 라인들 그리고 전력분배기로 구성되어 있기 때문에 전체 회로가 복잡해진다. 뿐만 아니라 현재로서는 위상천이기의 가격이 매우 비싸기 때문에 저렴한 위상배열 안테나 시스템을 구현하기가 힘들다. 또한 위상천이기에는 자체의 삽입손실이 존재하게 되고 이는 전체 시스템의 잡음지수를 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 이외에도 전력분배기들의 라인 손실도 주파수가 증가하고 전체회로의 면적이 커짐에 따라 증가하게 된다. 위상천이기의 삽입손실은 위상천이의 정도에 따라 변화하고 이는 배열 안테나의 복사 빔에 영향을 주게 된다. 그러므로 삽입손실이 적고 삽입손실의 변화가 적은 위상천이기를 구현하기

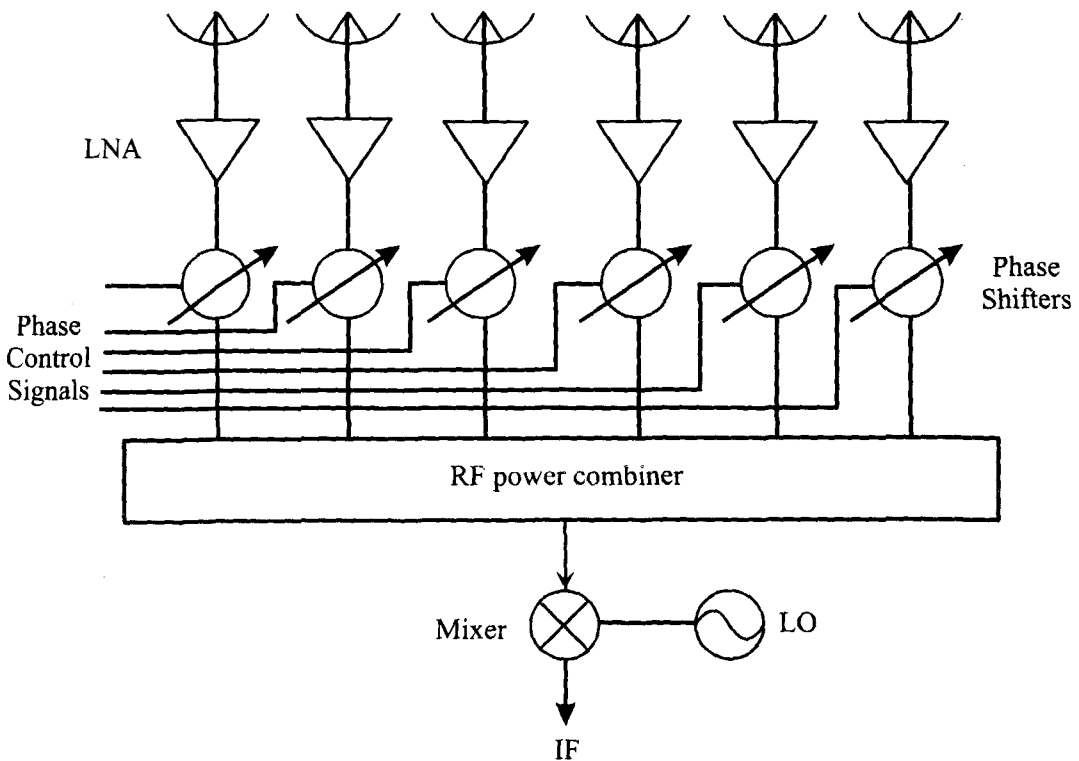


그림 1. 현재 널리 사용되고 있는 위상천이기를 이용하는 위상배열 안테나

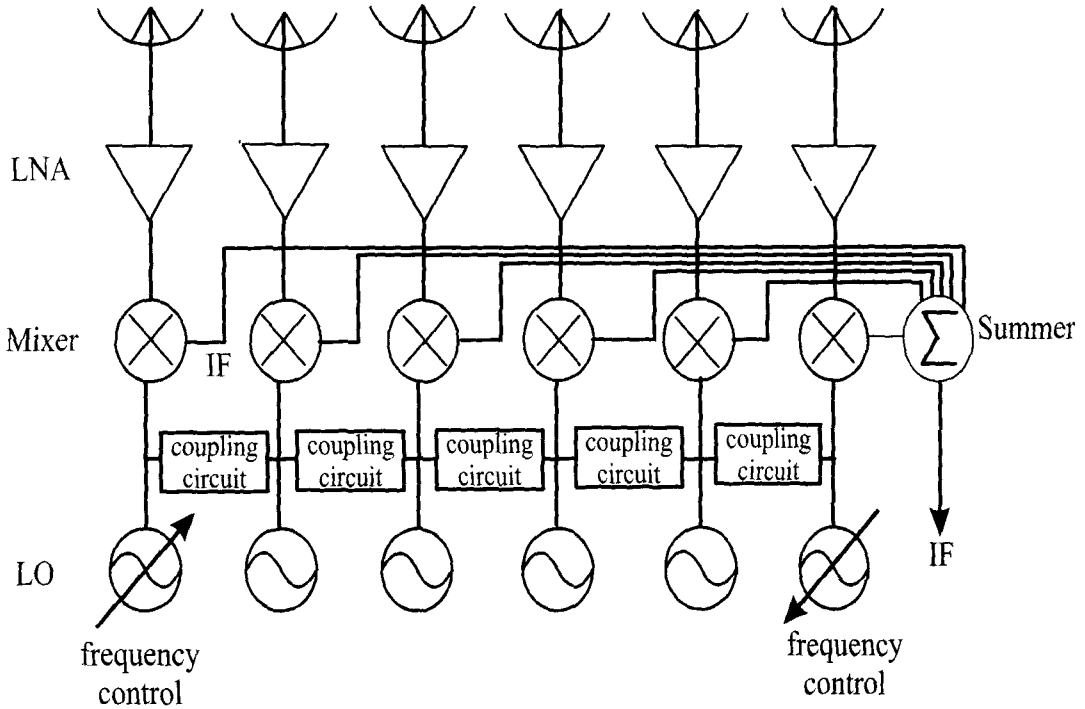


그림 2. 결합발진기를 이용한 수신용 능동위상배열 안테나

위한 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다.

최근 들어 선진국에서는 결합발진기를 이용하여 배열 안테나의 복사 빔을 제어하는 많은 방법이 연구되고 있다. 하나의 발진기가 임의의 발진주파수에서 발진하고 있을 때 외부에서 발진주파수와 다른 주파수를 가진 신호를 인가하면 발진기의 발진주파수는 인가한 신호의 주파수로 천이가 되고 이를 보상하기 위하여 인가 신호와 발진기 사이에는 인가 신호의 주파수에 따른 일정한 위상차가 얻어 지게 되는 원리를 이용하는 방법들이다. 이러한 방법들은 위상천이기를 사용하지 않고 발진기들의 상호 결합과 발진주파수를 이용하기 때문에 전체 배열 안테나 시스템이 간단하고 앞에서 언급한 위상천이기와 전력분배기로 인한 손실문제가 발생하지 않으므로 저렴하고 고이득의 위상배열 안테나 시스템을 위한 차

세대 기술이다. 본 논문에서는 이러한 결합발진기를 이용하여 빔을 제어하는 현재 부각되고 있는 여러 방법들에 관해 기술한다.

## II. 결합발진기를 이용한 위상배열 안테나의 기본원리

하나의 발진기가 임의의 주파수에서 발진하고 있을 때 외부에서 발진주파수와 다른 주파수를 가진 신호를 인가하면 발진기의 발진주파수는 인가한 신호의 주파수로 천이가 되고 이를 보상하기 위하여 인가 신호와 발진기 사이에는 인가 신호의 주파수에 따른 일정한 위상차가 얻어지게 되는 소위 injection locking 현상이 결합발진기배열 안테나의 기본원리이다. 간단한 단일 공조 발진기 모델을 이

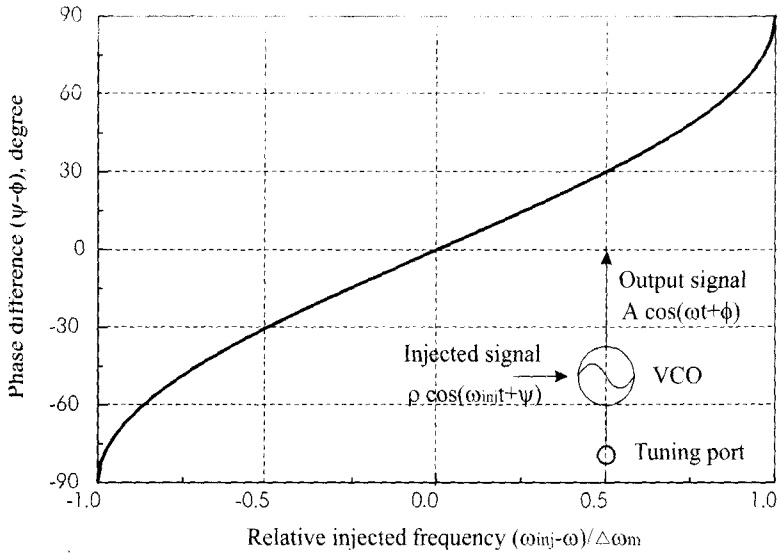


그림 3. 인가 신호 주파수와 발진주파수의 차이에 따른 인가 신호와 발진기의 위상차

용하면 인가 신호를 가진 발진기의 출력 위상은 Adler's 방정식에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega_o - \omega_{inj} + \frac{\rho\omega_o}{2Q\alpha} \sin(\Psi - \phi) \quad (1)$$

여기에서,  $\omega_o$ 는 발진기에 인가 신호를 주지 않았을 때의 발진주파수,  $\alpha$ 는 발진 진폭,  $Q$ 는 발진기

의 공진기 quality factor,  $\Psi$ 는 인가 신호의 위상,  $\phi$ 는 발진기의 위상을 각각 나타낸다.

인가 신호를 가한 후 발진기가 정상상태에 도달한다면 ( $\frac{d\phi}{dt} = 0$ ), 인가 신호와 발진기 사이의 정상 상태 위상차는 다음과 같이 된다.

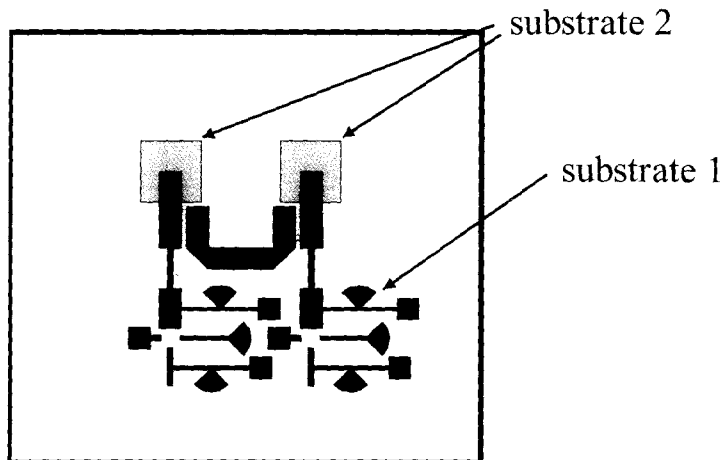


그림 4. 마이크로스트립 패치 안테나를 발진기의 공진기로 사용한 두 개의 발진기 배열

$$\omega_{inj} - \omega_o = \frac{\rho\omega_o}{2Q\alpha} \sin(\Psi - \phi) = \Delta\omega_m \sin(\Psi - \phi) \quad (2)$$

여기에서  $\Delta\omega_m$ 은 locking 범위를 나타내는데 인가 신호의 세기에 비례하고 발진기 공진기의 Q값에 반비례한다. 단, 위 수식은 인가 신호의 주파수와 발진기의 발진주파수가 이 범위 안에 있을 때만 유효하다고 할 수 있다. 이 수식을 가만히 살펴보면 인가 신호의 주파수를 발진기의 locking 범위 내에서 변화시키면 인가 신호와 발진기의 위상차를  $-90^\circ \sim +90^\circ$  정도를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 다시말하면, 인가 신호의 주파수를 고정시키고 발진기의 발진주파수를 변화시킴으로써 위상천이기를 사용하지 않고도 최대  $180^\circ$ 까지의 위상차를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 인가 신호를 대신하여 다른 또하나의 발진기를 사용할 수 있으므로

발진기들 사이의 상호 결합을 이용하여 빔을 제어하는 것이 가능하다는 것을 의미한다.

(그림 5)와 (그림 6) 그리고 (그림 7)에 두 개의 발진기들 사이의 injection locking과정을 나타내었다. 각각의 그림들은 (그림 4)에 나타난 2개의 발진기 배열에서 하나의 발진기의 발진주파수를 고정시키고 다른 하나의 발진주파수를 가변할 때 출력 스펙트럼의 변화를 보여 준다. 최종적으로 두 개의 발진기의 발진주파수가 서로 다른 하나의 발진주파수로 locking이 되고 앞에서 언급한 것처럼 이러한 주파수 천이를 보상하기 위해서 두 개의 발진기 사이에는 발진주파수의 함수로써 일정한 위상차가 생기게 되고 이 현상을 위상배열 안테나에 적용시키면 되는 것이다.

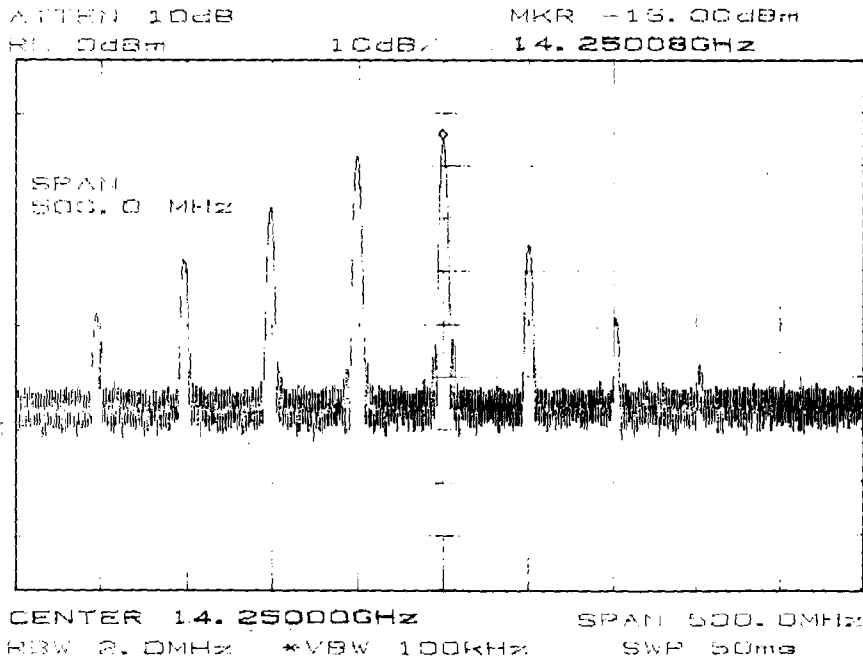


그림 5. 두 개의 발진기배열 안테나의 locking 스펙트럼(소자 1:14.2GHz, 소자 2:14.25GHz)

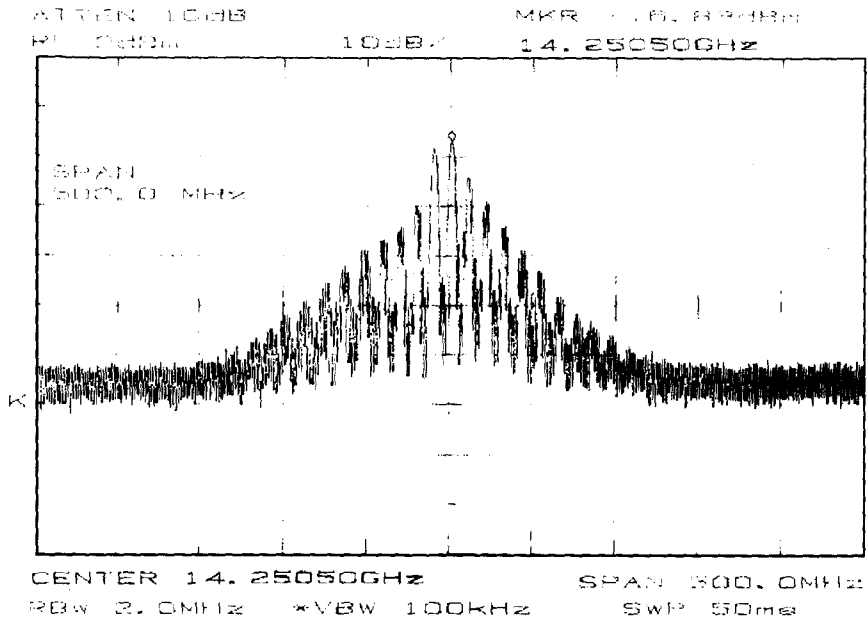


그림 6. 두 개의 발진기배열 안테나의 locking 스펙트럼(소자 1:14.225GHz, 소자 2:14.25GHz)

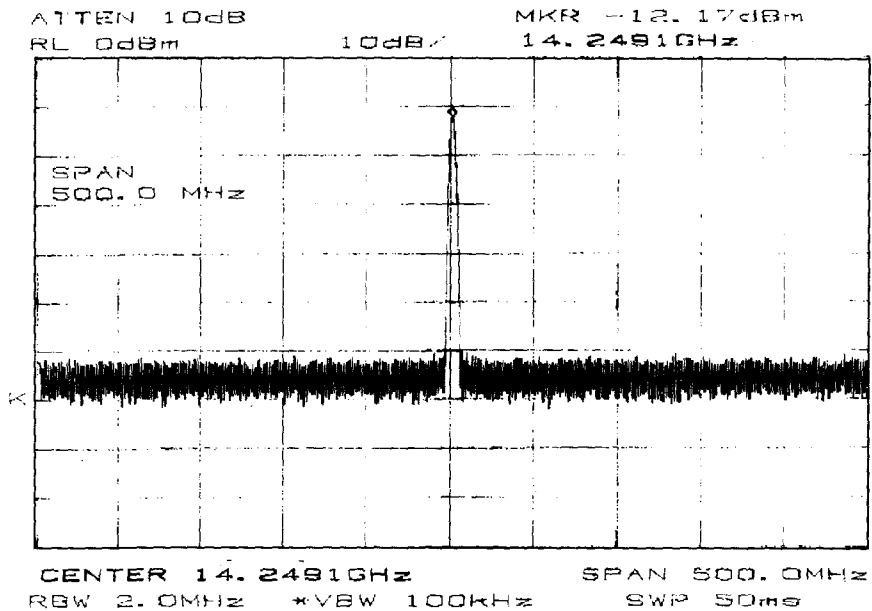


그림 7. 두 개의 발진기배열 안테나의 locking 스펙트럼(소자 1:14.226GHz, 소자 2:14.25GHz)

### III. 결합발진기배열 안테나의 기술 동향

#### 3.1. 단 방향 결합발진기배열 안테나 기술

단 방향 결합발진기배열 안테나는 증폭기의 단 방향성을 이용하여 발진기들 사이의 결합을 단 방향으로 하여 빔을 제어하는 방법이다. (그림 8)에 나타낸 것처럼 각 배열 소자들은 전압 조정 발진기와 패치 안테나로 구성되어 있다. 발진기들은 외부에 주입되는 인가 신호에 증속되어 있다. 첫 번째 발진기에 외부 인가 신호를 결합회로를 통하여 인가하면 첫 번째 발진기의 주파수는 인가 신호 주파수로 천이 된다. 첫 번째 발진기의 드레인 단에서 증폭기를 통하여 두 번째 발진기의 소스 단으로 인가하고 두 번째 발진기의 발진주파수를 locking 범위 내에서 변화시키면 발진주파수는 인가 신호 주파수로 천이된 첫 번째 발진기의 발진주파수로 천이된다. 그러므로 이를 보상하기 위하여 첫 번째 발진기와 두 번째 발진기 사이에는 두 번째 발진주파수에 따라 위상차가 얻어지게 된다. 그 다음 단계도 같은 원리가 적용된다. 이 방법은 단 방향 결합을 위해서 증폭기를 사용하므로 인가 신호의 세기를 조정할 수 있으

므로 전체 발진기배열 안테나의 locking 범위를 넓힐 수 있다는 장점이 있지만 발진기배열의 수에 따라 그만큼의 증폭기가 필요하다는 단점이 있다.

#### 3.2. 외부 인가 신호와 양 방향 결합을 이용한 결합발진기배열 안테나 기술

(그림 9)에 나타낸 것처럼 이 방법은 두 개의 외부 인가 신호와 양 방향 결합회로로 구성되어 있다. 두 개의 외부 인가 신호 사이에는 주파수는 같지만 하나의 위상천이기를 사용하여 일정한 위상차가 존재하게 한다. 이 방법에서는 발진기들의 발진주파수는 모두 동일하게 하는 대신 전체 회로에 외부 인가 신호에 의한 위상차를 줌으로써 이 위상차를 결합발진기들과 인가 신호들이 나누어 같도록 하는 방법이다. 즉, 두 개의 인가 신호 사이의 위상차를  $\Delta\theta$ 라고 하고 결합발진기배열들이  $N$ 개라고 하면, 인접 발진기배열 사이의 위상차는  $\Delta\theta/(N+1)$ 이 된다. 그러므로 이 방법은 하나의 위상천이기로 빔을 제어할 수 있지만 결합발진기배열들의 수가 증가하면 할수록 인접 발진기배열 사이의 위상차가 작게 되고 이는 결합발진기배열 안테나의 빔 제어 범위가

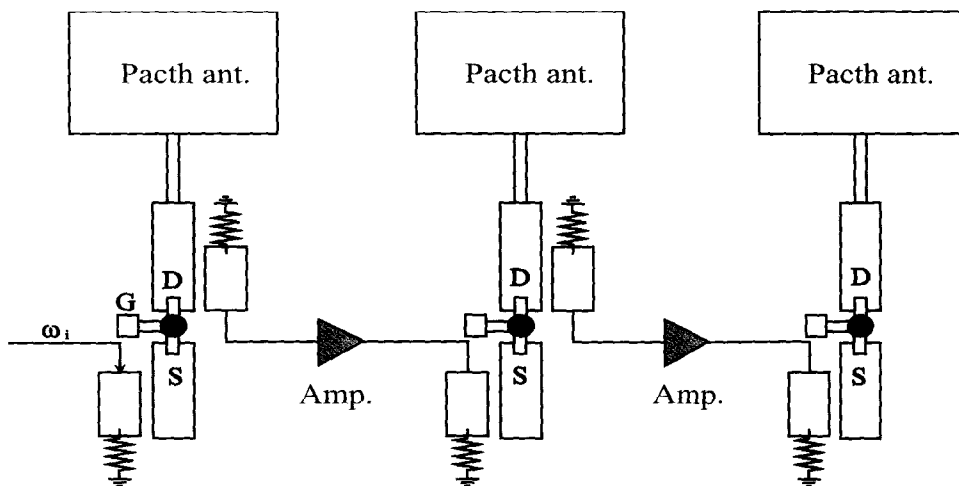


그림 8. 단 방향 결합발진기배열 안테나

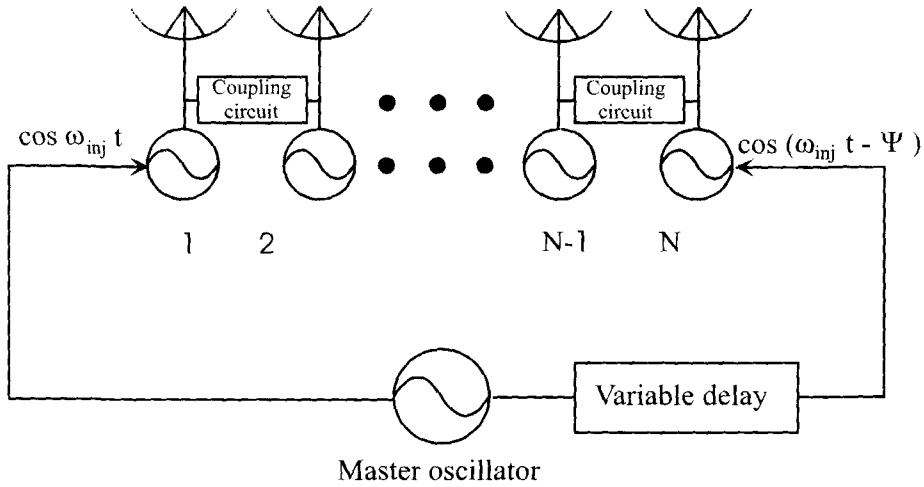


그림 9. 외부 인가 신호와 양 방향 결합을 이용한 결합발진기배열 안테나

작아지는 것을 말한다.

### 3.3. 발진주파수와 양 방향 결합을 이용한 결합발진기배열 안테나 기술

이 방법은 양 방향 결합을 이용하는데 이때의 발진기들 사이의 결합각은  $0^\circ$ 로 해주고 내부에 위치한 발진기들의 발진주파수는 동일하게 하고 단지 발진기배열의 양 끝에 위치한 발진기들의 발진주파수를 내부에 위치한 발진주파수( $f_c$ )를 중심으로 하여

$f_c \pm \Delta f_m$  만큼 가변하여 빔을 제어 하는 방법이다. 내부의 발진기배열들은 모두 동일 주파수에서 동작 하므로 하나의 단일 발진기로 생각할 수 있다. 그러므로 (그림 10)은 3개의 소자로 구성된 발진기배열로 볼 수 있다. 따라서 내부 발진기들의 발진주파수는 첫 번째 발진기의 발진주파수와  $\Delta f_m$ 만큼의 차이가 있고 세 번째 발진기의 발진주파수는 내부 발진기배열의 발진주파수보다  $\Delta f_m$ 만큼의 차이가 있다. 전체 발진기배열이 정상상태에 도달하게 되면 발진기배열의 발진주파수들은 하나의 발진주파수, 즉 모두 동일한 발진주파수에서 동작하는 내부 발

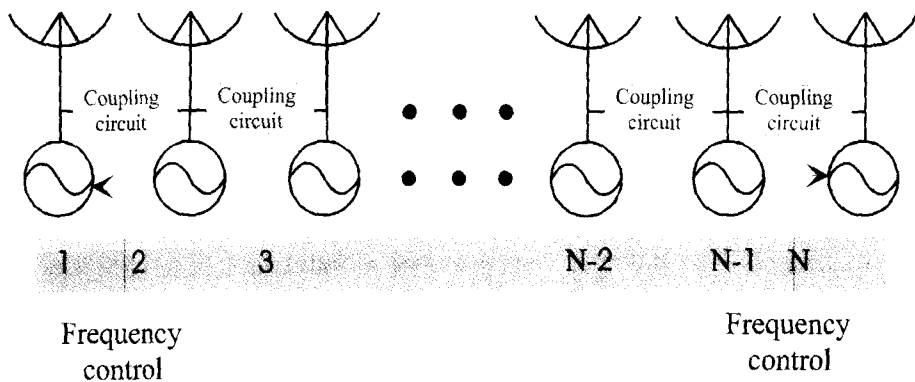


그림 10. 발진주파수와 양 방향 결합을 이용한 결합발진기배열 안테나



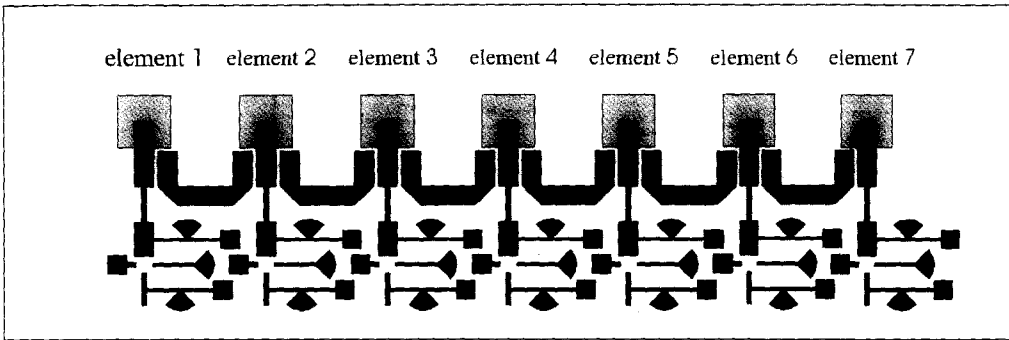
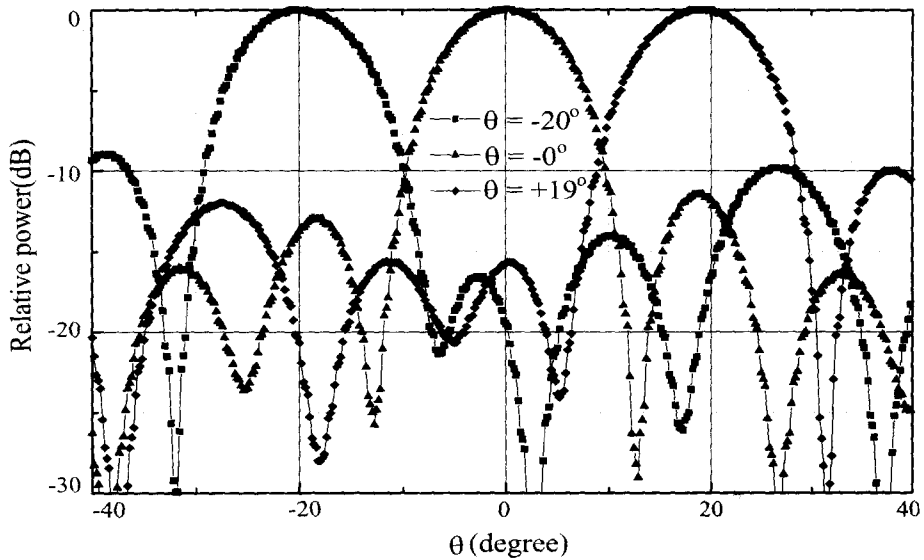


그림 11. 실제 구현된 발진주파수를 제어하는 발진기배열 안테나



		소자 1	소자 2	소자 3	소자 4	소자 5	소자 6	소자 7
발진 주파수 (GHz)	$\theta = -20^\circ$	14.235	14.250	14.250	14.250	14.250	14.250	14.265
	$\theta = 0^\circ$	14.250	14.250	14.250	14.250	14.250	14.250	14.250
	$\theta = 19^\circ$	14.265	14.250	14.250	14.250	14.250	14.250	14.240

그림 12. 구현된 발진기배열의 발진주파수에 따른 빔 제어 패턴

진기배열들의 발진주파수  $f_c$ 로 천이 된다. 그러므로 발진주파수들의 차이  $\Delta f_m$ 을 보상하기 위해서 발진기배열들 사이에는  $\Delta f_m$ 에 따른 일정한 위상차가 생기게 되는 것이다. 이 방법은 발진기배열의

수에 관계없이 단지 발진기배열의 양 끝에 위치한 발진기의 발진주파수를 반대 방향으로 조정함으로써 발진기배열 사이의 위상차를  $-90^\circ \sim +90^\circ$  범위까지 생성할 수 있지만 (그림 3)에 보여진 것처럼

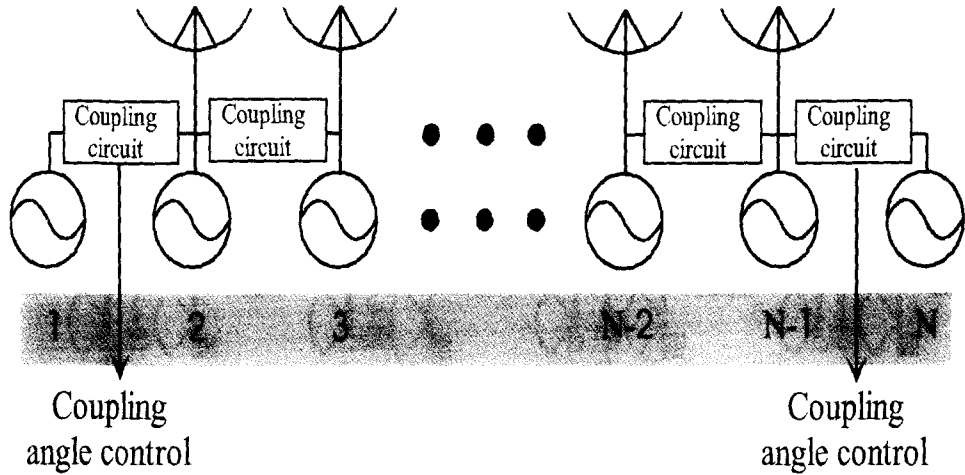


그림 13. 양 방향 결합 각을 이용한 발진기배열 안테나

발진기배열 사이의 위상차는 발진주파수의 비선형 함수로 locking 범위 끝에서 위상차가 많이 생긴다. 발진기배열에서 locking 범위의 근처에서는 발진기배열의 위상잡음이 증가하고 또한 실제 구현할 때 locking 범위의 근처에서는 전체 발진기배열 안테나의 locking을 보장할 수 없으므로 빔 제어 범위는 이론적으로 가능한 값보다 작아지는 단점이 있다.

(그림 11)과 (그림 12)는 실제 구현된 발진기배열 안테나의 layout과 측정된 복사 패턴을 나타낸

다. 발진기들의 능동 소자로 MESFET을 이용하였고 기판은 유전율 2.5 이고 기판 두께가 31 mil 인 테플론 기판을 사용하였다. 발진기의 공진기와 안테나로 사용되는 패치 안테나로는 전자기적 결합 마이크로스트립 패치 안테나를 사용하였다.

### 3.4. 양방향 결합 각을 이용한 발진기배열 안테나 기술

(그림 13)에 보여진 양 방향 결합 각을 이용한 발

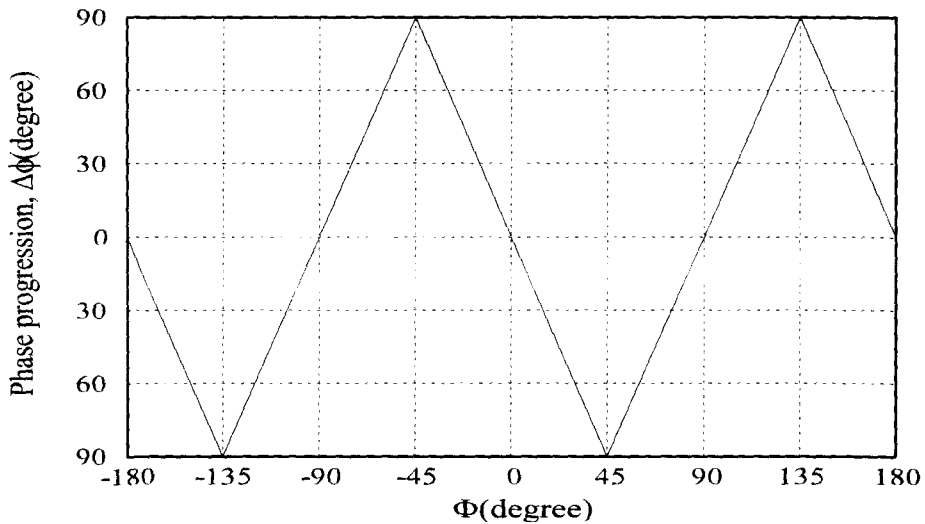


그림 14. 결합 각( $\phi$ )에 따른 발진기들 사이의 위상차

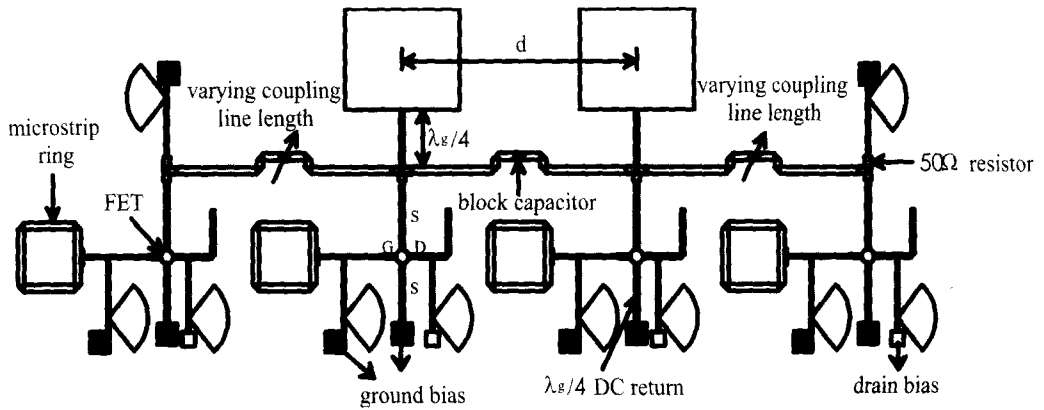
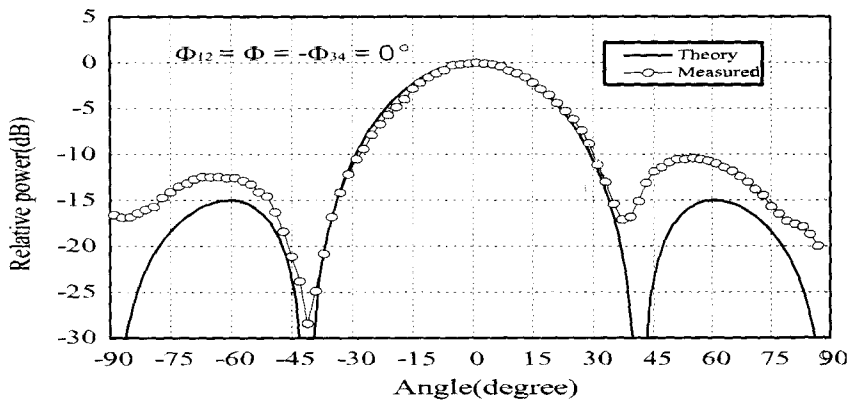
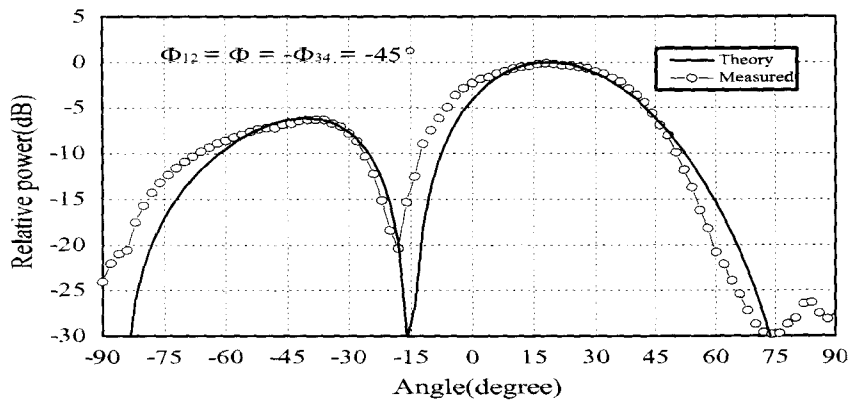


그림 15. 결합 각을 이용하는 빔 제어 배열 안테나의 layout



(a)



(b)

그림 16. 결합각에 따른 빔 복사 패턴의 실험치와 이론치 비교

(a)  $\phi = 0^\circ$  (b)  $\phi = -45^\circ$

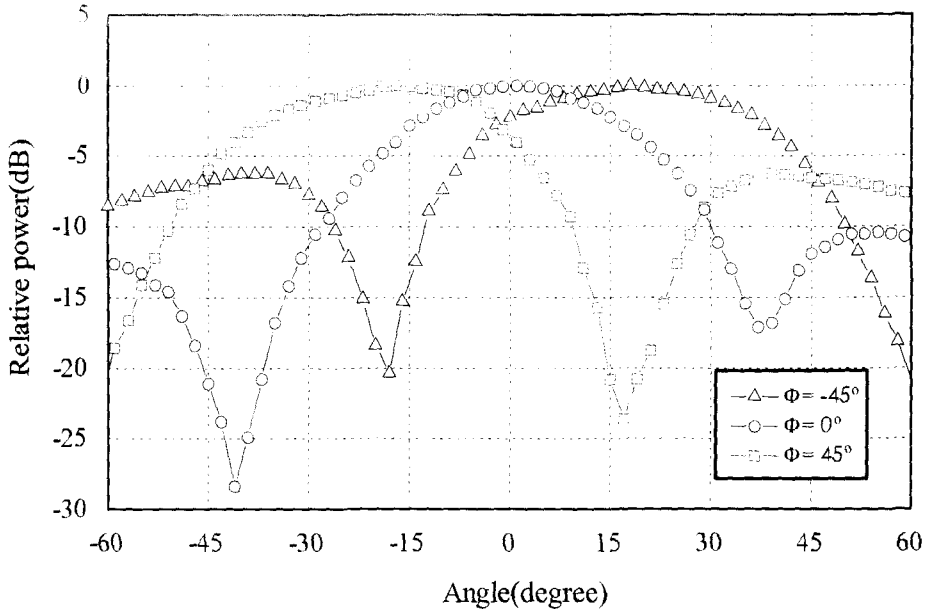


그림 17. 결합 각에 따른 빔 복사 패턴의 실험치

진기배열 안테나의 기본 원리는 앞 절에서 설명한 발진주파수를 이용한 방법과 유사하다. 위상에 대한 시간미분은 주파수이다. 발진기 사이의 결합 각을 모두  $0^\circ$ 로 한 상태에서 양 방향 결합과 발진기배열의 양 끝에 위치한 발진기의 발진주파수를 내부에 위치한 발진기들의 모두 동일한 발진주파수를 중심으로 반대 방향으로 조정하여 빔을 제어하였다. 이와 유사하게 결합 각을 이용하는 방법은 모든 발진기들의 발진주파수는 같도록 한 상태에서 발진기배열의 양 끝에 위치한 결합 회로의 결합 각을 내부에 위치한 결합 회로들의 모두 동일한 결합 각  $0^\circ$ 를 중심으로 반대 방향으로 조정하여 빔을 제어하는 방법이다. 그림 13에 양 끝에 위치한 결합 회로의 결합 각에 따른 발진기들 사이의 위상차를 나타내었다.

위상차는 발진주파수를 제어하는 방법에서는 발진주파수의 비선형 함수이었지만 이 방법에서는 결합 각의 선형함수이다. 이 방법 역시 발진기 사이의 위상차는 발진기들의 수에 관계없이  $-90^\circ \sim +90^\circ$  범위에 걸쳐 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한

발진주파수들은 모두 동일하게 해줌으로써 발진주파수를 제어하는 방법보다 위상잡음이나 전체 시스템의 안정도 면에서 뛰어나다고 할 수 있다. 하지만 결합 각을 정확히 제어하기 어렵다는 단점이 있다. (그림 15)와 (그림 16) 그리고 (그림 17)은 결합 각을 이용하는 빔 제어 배열 안테나의 실제 구현된 회로의 layout과 실험결과들을 나타낸다.

#### IV. 결 론

위상배열 안테나 시스템에서 위상천이기를 이용하는 방법은 원리적으로 간단하지만 실제 구현할 때 위상천이기를 제어하기 위한 제어 신호와 DC 바이어스 라인들 그리고 전력분배기로 구성되어 있기 때문에 전체 회로가 복잡해진다. 뿐만 아니라 현재로서는 위상천이기의 가격이 매우 비싸기 때문에 저렴한 위상배열 안테나 시스템을 구현하기가 힘들다. 또한 위상천이기에는 자체의 삽입손실이 존재하게

되고 이는 전체 시스템의 잡음지수를 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 이것 외에도 전력분배기들의 라인 손실도 주파수가 증가하고 전체회로의 면적이 커짐에 따라 증가하게 된다. 위상천이기의 삽입손실은 위상 천이의 정도에 따라 변화하고 이는 배열 안테나의 복사 빔에 영향을 주게 된다. 그러므로 삽입손실이 적고 삽입손실의 변화가 적은 위상천이기를 구현하기 위한 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 기존의 위상천이기를 이용하지 않고 발진기들의 결합을 이용함으로써 배열 안테나의 복사 빔을 제어 할 수 있는 결합발진기배열 안테나의 최근 기술동향을 살펴보았다. 이러한 여러 기술들은 위상천이기를 사용하는 방법보다 비용이나 전체 시스템의 구성 면에서 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 또한 결합발진기배열 안테나 기술에서 배열 소자들이 가질 수 있는 최대 위상차는  $-90^\circ \sim +90^\circ$  범위이므로  $-180^\circ \sim +180^\circ$  범위로 확대하기 위한 노력이 필요할 것이다. 또한 실제 상용화를 목표로 할 때는 발진기들의 주파수 안정화 문제나 전체 시스템의 위상잡음 특성 등 개선해야할 과제를 남기고 있다.

#### \* 참고 문헌

1. B. Van der Pol, "The nonlinear theory of electric oscillations," Proc. IRE., Vol. 22, pp. 1051-1085, Sep. 1934.
2. K. Kurokawa, "Injection-locking of solid-state microwave oscillators," Proc. IEEE, Vol. 61, pp. 1386-1409, Oct. 1973.
3. M. Kuramitsu and F. Takase, "An analytical method for multimode oscillators using averaging potential," Trans. IECEJ, vol. J66-A, pp. 336-343, Apr. 1983.
4. J. W. Mink, "Quasi-optical power-combining of solid state millimeter wave sources," IEEE Trans. MTT., vol. 34, pp. 273-279, Feb. 1986.
5. R.A. York and R.C. Compton, "Quasi-optical power-combining using mutually synchronized oscillator arrays," IEEE Trans. MTT., vol. 39, pp. 1000-1009, Jun. 1991.
6. R.A. York and R.C. Compton, "Mode-locked oscillator arrays," IEEE Trans. Microwave and Guided wave lett., vol. 1, pp. 215-218, Aug. 1991.
7. K.D. Stephan "Inter-injection locked oscillators for power-combining and phased array," IEEE Trans. MTT., vol. 34, pp. 1017-1025, Oct. 1986.
8. R.A. York, "Nonlinear analysis of phase relationships in quasi-optical oscillator arrays," IEEE Trans. MTT., vol. 41, pp. 1799-1809, Oct. 1993.
9. P. Liao and R.A. York, "A new phase-shifterless beam-scanning technique using arrays of coupled oscillators," IEEE Trans. MTT., vol. 41, pp. 1810-1815, Oct. 1993.
10. R. A. York, P. Liao and J. J. Lynch, "Oscillator array dynamics with broadband N-port coupling networks," IEEE Trans. MTT., vol. 42, pp. 2040-2045, Nov. 1994.
11. J. Lin, S. T. Chew, and T. Itoh, "A unilateral injection-locking type active phased array for beam scanning," IEEE MTS-S Int. Microwave Symp.

Dig., pp. 1231-1234, Jun. 1994.

12. J. H. Hwang and N. H. Myung, "A new beam-scanning technique by controlling the coupling angle in a coupled oscillator array," IEEE Microw. Guid. Wave Lett., vol. 8, pp. 191-193, May 1998.



명 노 훈

1976. 2. 서울대학교 전기공학과 졸업(학사)

1982. 12. EE Dept., Ohio State Univ. 졸업(석사)

1986. 8. EE Dept., Ohio State Univ. 졸업(박사)

1986~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수

\*관심분야: 전파전파 및 산란, 안테나 및 레이더,

EMI/EMC, 이동 및 위성통신