

전송선로로 결합된 능동 위상차배열 안테나의 동작특성에 관한 실험적 연구

論 文

53C-3-10

Experimental Studies on the Performance of the Active Phased-Array Antenna Coupled by Transmission Line

崔 泳 圭*
(Young-Kyu Choi)

Abstract - In order to increase the coupling efficiency of the power and phase of the active phase array antenna, we have fabricated the active phased-array antenna which is coupled by the transmission line, and investigated the relationship between the length of the coupling transmission line and coupling power and phase. The following three types of driving method - (1) giving the frequency difference between the two active antenna, (2) applying the input signal to the one side of the two antennas, and changing the eigen frequency of the other side antenna, (3) applying the different phase inputs to the active antennas was investigated. The experimental results showed that the interval of the antenna elements has not affected the power and the phase of the antenna.

Key Words : active antenna, phased-array antenna, transmission line coupling, antenna coupling

1. 서 론

최근 정보통신의 발달에 따라 대량의 정보를 무선으로 전송하는 수단으로 마이크로파나 밀리파가 이동체 통신이나 위성통신 등에 이용되고 있다. 특히 휴대전화의 폭발적인 보급에 따라 다수의 통신 채널의 확보가 주요 관심사로 부상하여 방사방향을 고속으로 주사할 수 있는 고체 마이크로파원이 필요하게 되었다. 방사 전자파를 고속으로 주사하는 방법으로 위상차 배열 안테나(phased-array antenna)가 주로 사용된다. 지금까지 이러한 안테나의 위상제어에는 주로 이상기가 이용되어 왔으나^{1, 3)}, 주파수가 높아지면 손실이 커지므로 될 수 있는 대로 이상기를 이용하지 않는 안테나의 구성이 필요하다⁴⁾. 이를 실현하는 방법으로 고체소자를 이용한 발진기와 안테나를 결합하여 능동안테나를 구성하고, 이것을 1차원적 또는 2차원적으로 배치하는 능동 위상차 어레이 안테나가 연구되고 있다. 이런 안테나에서는 각 발진기의 출력위상을 적당한 방법으로 제어하면 방사방향을 고속으로 주사할 수 있다. 또 마이크로파나 밀리파대에서 동작하는 고체능동소자는 그 출력이 매우 작으므로, 필요한 전력을 얻기 위해서는 다수 개 소자의 출력을 공간 중에서 합성하여 고출력을 얻을 수 있다는 이점도 있다^{5, 6)}. 그러나 공간 전자파를 이용하여 안테나의 출력을 결합하는 방법에서는 결합의 크기나 위상이 안테나 사이의 거리에 의해서 결정되기 때문에 안테나 어레이의 구성에 있어서 그 자유도가 매우 작다는 것이 결점으로 지적되고 있다. 고속주사, 고출력의 특성을 유지하

면서도 안테나 구성의 자유도를 향상시키기 위해서는 전송선로를 이용하여 능동 안테나 사이의 결합을 취하는 방법을 생각할 수가 있다.

본 연구에서는 전송선로를 이용하여 결합시킨 능동 안테나 어레이의 동작특성에 대하여 실험적인 고찰을 하였다. 우선, X-band영역에서 동작하는 능동안테나를 제작하여 발진기의 동기특성을 측정하였다. 또 발진기에 전송선로를 연결한 경우에 대하여 전송선로가 발진기의 동기특성에 미치는 영향을 조사하였다. 시험 제작한 발진기에 구형 패치안테나를 부착하여 2요소 능동 안테나를 제작한 후, 이들 사이를 전송선로로 결합하여 어레이를 구성하고 결합위상과 전송선로와의 관계를 측정하였다. 시험 제작한 2요소 안테나 배열을 (1) 양쪽 주파수 제어방식⁷⁾, (2) 한쪽 주파수 제어방식⁸⁾, (3) 양쪽 주입 위상제어 방식^{9, 10)} 등 3가지 방식으로 구동하여 주사각도에 따른 방사전력을 측정하여 안테나 특성을 조사하였다.

2. 발진기의 제작과 특성

2.1 FET 발진기의 구성

그림 1에 시험 제작한 FET발진기의 개형을 보였다. 발진기는 특성임피던스가 50Ω인 마이크로스트립 선로를 이용하여 제작하였다. 소스단자가 2개 있는 FET를 이용하므로 각각의 단자에 길이 L_s 의 선로를 접속하고 그 끝을 접지함으로써 소스 접지를 취하였다. 게이트 단자에는 길이 L_g 의 선로를 접속하고 그 끝을 개방하였다. 출력전력은 드레인 단자에서 50Ω의 선로를 부하 임피던스로 접속하여 끌어내도록 구성하였다. 소스 단자는 길이 L_s 의 선로를 접속하고 그 끝은 기판에 구멍을 뚫어 기판 뒷면의 접지도체와 리드 선을 이용하여 접속하였다. 게이트 및 드레인에 인가하는 직류바이어스는 단

* 正會員 : 新羅大學校 光電子工學科 教授
接受日字 : 2003年 7月 5日
最終完了 : 2004年 1月 4日

자에서 4.1mm 떨어진 위치에 접속한 폭 0.2mm의 선로를 통하여 공급하였다. 바이어스 선로에는 불필요한 마이크로파가 유입하지 않도록 부채형 쇼크를 제작하여 부착하였다.

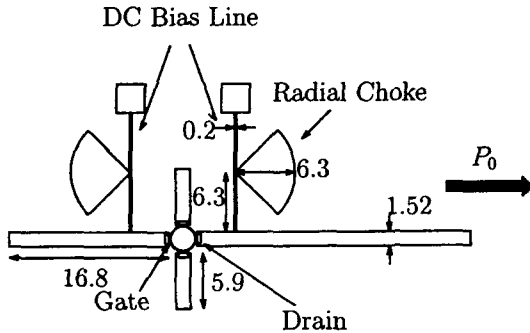


그림 1 FET발진회로의 개형(단위 mm)
Fig. 1 Schematic diagram of FET oscillator

2.2 발진기의 특성과 외부 Q의 특성

게이트 소스간의 전압 V_{GS} 및 드레인 소스간의 전압 V_{DS} 의 값을 변화시켜 출력전력과 발진주파수를 측정하였다. 드레인 소스간의 전압 V_{DS} 를 증가시키면 출력전력은 상승하였으나 발진주파수는 감소하는 경향을 나타냈다. 게이트-소스간의 전압 V_{GS} 를 감소시키면 출력전력은 그다지 변하지 않았으나 발진주파수가 증가하는 경향을 나타냈다. 더욱이 사용하는 FET에 따라서는 V_{GS} 를 변화시키면 출력전력이 변화하는 경우도 나타났다. 위상차배열 동작에 있어서 안테나의 성능을 결정하는 중요한 파라미터로 발진기의 외부Q(Q_{ex})가 있다. 동기계에 있어서는 발진기의 Q_{ex} 가 크면 고유발진주파수 변동의 영향을 받기 쉬워지므로 비동기로 되기 쉽다. 따라서 여기서는 발진기의 Q_{ex} 를 주입동기를 이용한 방법으로 측정하였다. 자려발진주파수 f_1 , 출력 P_0 에서 발진하는 피측정 발진기에 대해서 주파수 f_m , 전력 P_m 의 주입신호를 별도의 고출력 발진기로 인가하였다. 주입동기가 한계에 도달하였을 때의 주파수차를 $|f_m - f_1|_{max}$ 로 하면 발진기의 Q_{ex} 는 Alder의 방정식^[11]에서

$$\frac{|f_m - f_1|_{max}}{f_1} = \frac{1}{Q_{ex}} \sqrt{\frac{P_m}{P_0}} \quad (1)$$

이 된다.

발진기가 주입동기하고 있는 것을 스펙트럼 어널라이저로 관측하면서 주입신호의 전력을 감소시켜 주입동기에서 이탈하기 직전의 전력을 측정하였다. 또 주입신호 전력은 방향성 결합기를 이용하여 그 일부를 모니터함으로써 측정하였다. 발진기에 바이어스전압 $V_{DS} = 5[V]$, $V_{GS} = 0[V]$ 를 인가하였을 때 고유발진주파수 $f_1 = 8.9161[GHz]$, 출력 $P_0 = 28.1[mW]$ 였다. 동기특성의 측정결과를 그림 2에 나타냈다. 그림의 점선은 실측치들, 직선은 주파수 원점을 통과하도록 직선으로 근사한 것이다. 식 (1)을 이용하여 계산하면 외부 Q는 34.1이 되었다.

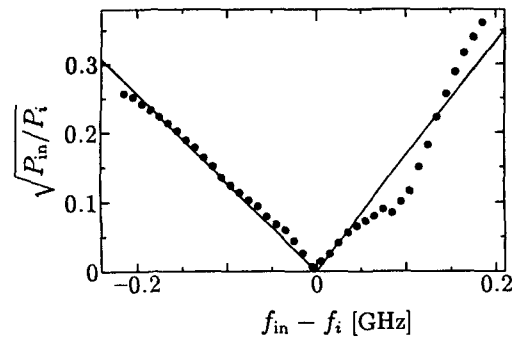


그림 2 발진기의 동기특성
Fig. 2 Synchronous characteristics of the oscillator

2.3 결합선로를 접속한 발진기의 특성

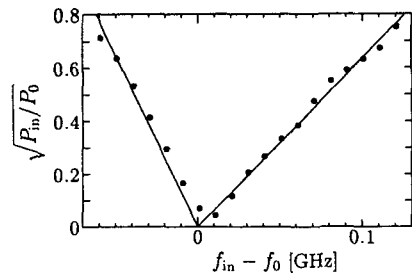
능동안테나를 결합시켜서 배열을 구성하기 위해서는 발진기 사이의 결합을 위한 회로가 필요하다. 발진기에 방향성 결합기를 이용하여 결합선로를 접속하였다. 이 선로는 폭 1.5mm, 특성임피던스가 50Ω인 마이크로스트립선로로 결합부에는 1개의 포트를 개방시킨 방향성결합기를 사용하였다. 바이어스전압 V_{DS} , V_{GS} 의 변화에 대한 발진주파수, 출력전력, 결합선로에의 출력전력의 관계를 관측한 결과, 결합선로가 발진특성에는 그다지 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

바이어스전압 $V_{DS} = 5[V]$, $V_{GS} = 0[V]$ 에서 자려발진주파수 f_1 는 8.91280GHz였다. 이 상태에서 출력선로 및 결합선로 측에서 본 동기특성을 측정한 결과를 그림 3에 보였다. 그림의 직선은 주파수 차의 원점을 통과하도록 직선 근사한 것이다. P_0 의 값은 각각의 선로에서의 출력전력의 값이다. 이 그림으로부터 외부 Q를 계산하면 결합선로 측에서 본 외부 Q는 약 2224, 출력선로 측에서 본 외부 Q는 약 87이었다.

3. 능동 안테나 어레이

3.1 구형 패치안테나

발진기의 출력을 공간에 방사하기 위하여 구형 패치안테나를 사용하였다. 공진주파수가 약 9GHz로 되도록 설계한 방형 패치안테나의 구성을 그림 4에 보였다. 패치 안테나의 끝에 공진주파수를 미세조정하기 위하여 폭 1.0mm의 스테브를 설치하였다. 스테브의 길이가 0의 경우에 대한 반사계수의 진폭을 그림 5에 보였다. 공진주파수가 9.291GHz에서 공진시에



(a)

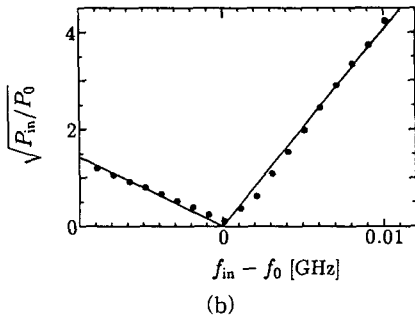


그림 3 결합선로를 접속한 발진기의 동기특성 (a) 출력측에서 본 경우 (b) 결합선로 측에서 본 경우

Fig. 3 Synchronous characteristics of the oscillator coupled with transmission line (a) characteristic looked from the output side, (b) characteristic looked from the transmission line side

는 안테나는 거의 정합상태에 있으나 비공진시에는 안테나가 거의 리액턴스분 만으로 구성된 임피던스가 되는 것을 알 수 있다. 주파수가 공진주파수와 동일한 9.291GHz, 전력 10mW의 신호를 입사시켜서 측정된 H면방사 패턴을 그림 6에 보였다. 단, 그림의 가로축에는 패치안테나에서 1.5m 떨어져 있는 X밴드용 혼안테나로 수신한 전력을 나타낸다. 정면에서의 수신전력이 약 6.2μW로 패치안테나에서의 방사전력과 수신 안테나에서의 정면방향의 수신전력의 비는 약 0.062%가 되었다.

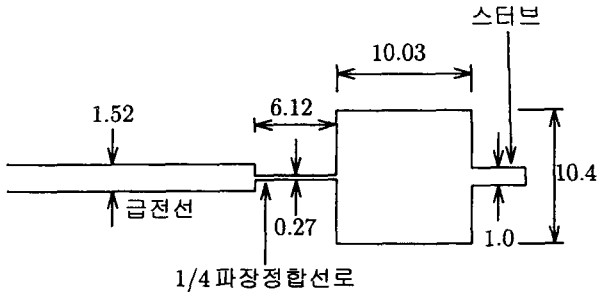


그림 4 구형 패치안테나의 구성(단위 mm)
Fig. 4 Structure of the rectangular patch antenna

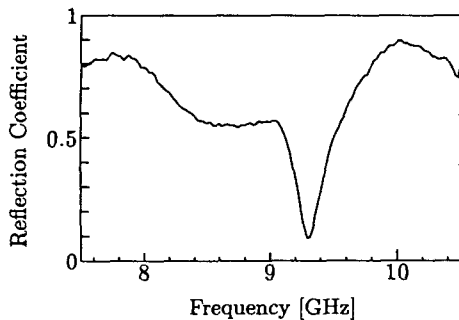


그림 5 패치안테나 반사계수의 진폭특성
Fig. 5 Reflection characteristics of the patch antenna

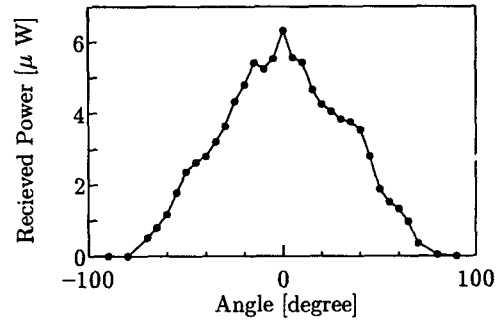
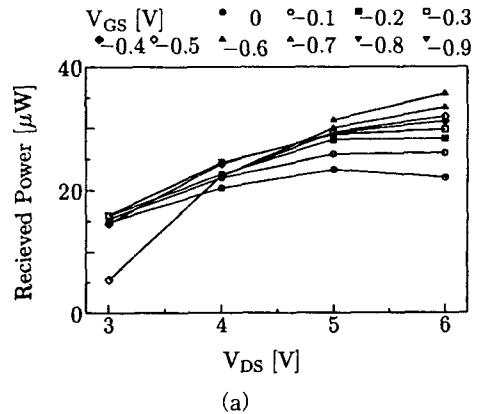


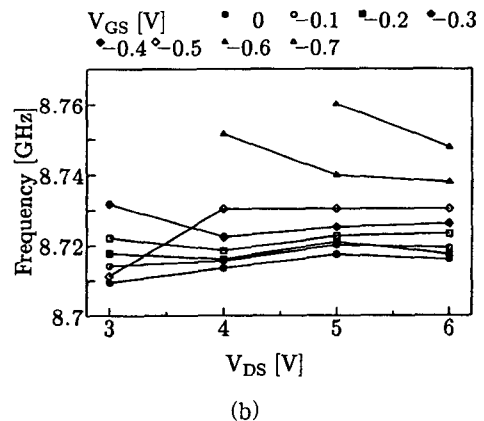
그림 6 패치안테나의 H면 방사특성
Fig. 6 H-plane radiation characteristics of the patch antenna

3.2 능동 안테나의 특성

패치안테나와 FET발진기를 접속하여 능동안테나를 구성하였다. 출력전력과 발진주파수의 측정결과를 그림 7에 보였다. V_{DS} 를 증가시켜도 발진주파수는 그다지 변하지 않으나, V_{GS} 를 증가시키면 발진주파수는 높아진다. 출력전력은 V_{DS} 의 증가에 따라 높아진다. 바이어스전압 $V_{DS} = 5[V]$, $V_{GS} = -0.4[V]$ 로 한 경우 H면 방사패턴을 그림 8에 보였다. 그림 6과 거의 같은 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 7 제작한 능동 안테나의 발진 특성 (a) 출력전력, (b) 발진주파수
Fig. 7 Characteristics of the fabricated active antenna, (a) out power (b) oscillation frequency

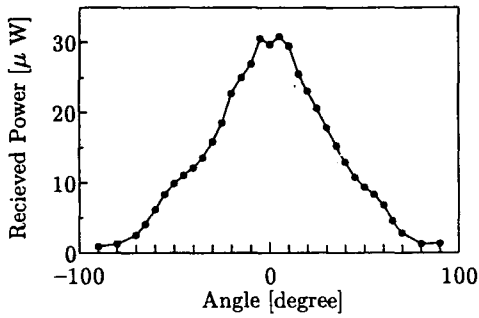


그림 8 능동안테나의 H면 방사패턴
Fig. 8 H-plane radiation pattern of the active antenna

3.3 능동 안테나 사이의 결합위상

능동 안테나 사이의 결합위상을 0으로 할 필요가 있으나 결합위상은 결합선로 길이 L_c 에 의존한다. 따라서 그림 9처럼 L_c 가 다른 능동 안테나를 제작하여 그들 사이의 상호동기 특성에 대하여 살펴보았다. 2개의 능동 안테나의 고유주파수를 f_1 으로 맞추고 상호동기시의 동기주파수 f_0 와 고유주파수 f_1 의 차를 그림 10에 보였다. 가로축은 9GHz의 마이크로스트립 선로의 파장 $\lambda_g = 23.6$ [mm]로 규격화하였다. 같은 L_c 에서도 점이 복수개 있는 것은 복수개의 배열을 측정 한 결과이

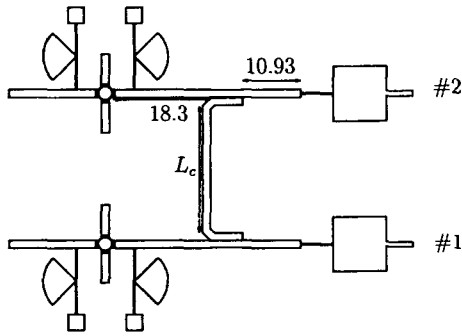


그림 9 2요소 능동 안테나 배열의 구성(단위 mm)
Fig. 9 Structure of 2-elements active antenna array

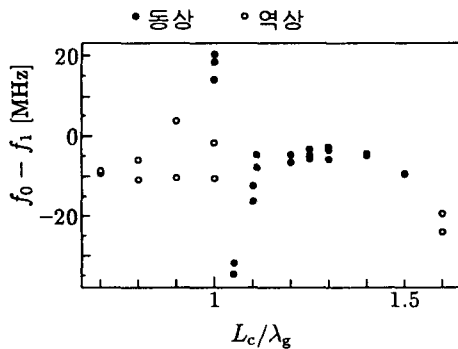


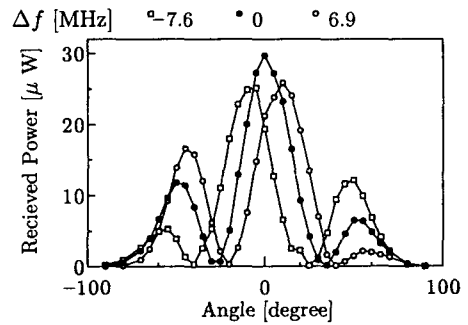
그림 10 L_c 의 변화에 따른 상호 동기주파수의 변화
Fig. 10 Relationship between the variation of mutual oscillation frequency and the variation of L_c

다. 동상발전인지 역상발전인지는 방사패턴을 관측하는 것으로 판단하였다. 결합위상이 0으로 되는 것은 동상발전하는 L_c 범위의 중심으로서 관측결과로 판단하면 $L_c = 1.3\lambda_g = 30.7$ [mm]일 때 결합위상이 0으로 되었다.

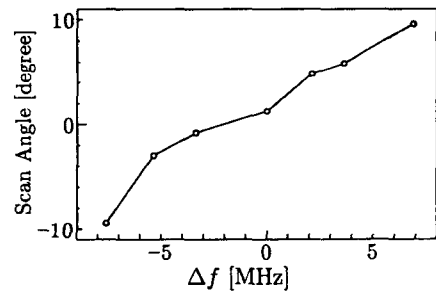
4. 위상차 배열 동작

4.1 양쪽 주파수제어 방식

그림 9처럼 구성된 능동안테나 #1의 바이어스전압을 $V_{GS} = -0.17$ [V], $V_{DS} = 4.45$ [V]로 하면 발진주파수 f_1 은 8.44962GHz에서 발진출력은 8.50mW였다. 능동안테나 #2의 바이어스전압을 $V_{GS} = 0$ [V], $V_{DS} = 5.83$ [V]로 하면 발진주파수 f_2 는 같은 8.44962GHz에서 8.02mW였다. 두개의 능동안테나를 동기시키면 동상으로 동기하여 상호 동기주파수는 8.44650GHz였다. 이번 위상차배열 동작실험에서는 안테나가 2개뿐이므로 능동안테나 #2의 고유주파수 f_2 를 고정하고 능동안테나 #1의 고유주파수를 FET의 바이어스전압으로 제어하여 $f_0 = f_2 - \Delta f$ 로 변화시켜 실험을 실시하였다. $\Delta f = 0$ 의 경우와 동기한계까지 변화시켰을 때의 방사패턴을 그림 11(a)에, 방사패턴에서 구한 방사각을 그림 11(b)에 보였다. 그림 11(b)를 보면 빔의 방사방향은 약 -9.8° 에서 $+9.8^\circ$ 까지 19.6° 변화였다. 또 개개의 능동안테나에서의 출력의 진폭과 위상차의 추정결과를 그림 12에 보였다. 능동안테나 사이의 위상차는 -0.31π 에서 0.36π 까지 변화하므로 위상차배열 동작을 하고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 11 위상차배열 동작특성 (a) 방사패턴 (b) 주사각도
Fig. 11 Characteristics of phased-array antenna (a) radiation pattern (b) scanning angle

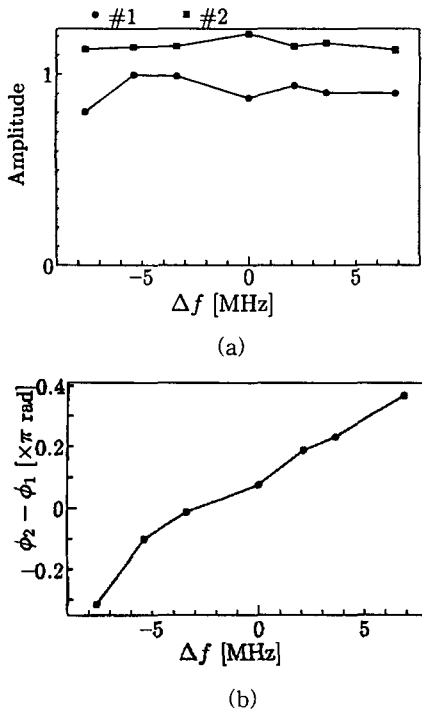


그림 12 안테나 개체의 특성 추정결과 (a) 진폭, (b) 위상차
 Fig. 12 Assumed value of the single-element antenna
 (a) amplitude, (b) phase difference

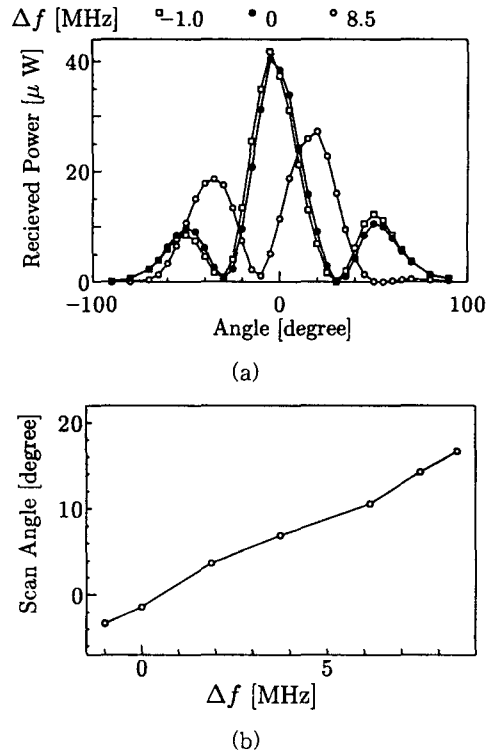


그림 13 위상차배열 동작 특성 (a) 방사패턴 (b) 주사각도
 Fig. 13 Characteristics of the phased-array antenna
 (a) radiation pattern (b) scanning angle

4.2 한쪽 주파수 제어 방식

능동안테나 #1의 바이어스 전압을 $V_{GS} = -0.20$ [V], $V_{DS} = 4.50$ [V]로 하면 발진주파수 f_1 은 8.45100GHz, 발진출력은 8.3mW였다. 발진기 #2의 바이어스 전압을 $V_{GS} = -0.10$ [V], $V_{DS} = 2.54$ [V]로 하면 발진주파수 f_2 는 같은 8.45100GHz에서 출력이 9.1mW였다. 능동안테나 #2의 결합선로에서의 출력이 1.7mW였으므로 주입 신호량은 2mW로 하였다.

주입신호를 인가하지 않은 상태에서 능동안테나를 상호동기시키면 동상으로 동기하여 상호동기주파수는 8.44775GHz였으므로 같은 주파수의 주입신호를 능동안테나 #2에 인가하였다. 이 상태에서 위상차배열동작의 실험을 실시한 결과를 그림 13에 보였다.

그림 13 (a)는 $\Delta f = 0$ 의 경우와 Δf 를 동기한계까지 변화시켰을 때의 방사패턴이고 그림 13 (b)에는 방사패턴으로부터 구한 방사빔의 주사각도를 나타낸다. 또 개개의 안테나에서의 출력의 진폭과 위상차의 추정결과를 그림 14에 보였다. 그림 14(b)에서 빔의 방사방향은 약 -3.8° 에서 $+17^\circ$ 까지 20.8° 변화였다.

능동안테나 사이의 위상차는 -0.085π 에서 0.65π 까지 변하고 있으므로 위상 배열동작하고 있음을 알 수 있다.

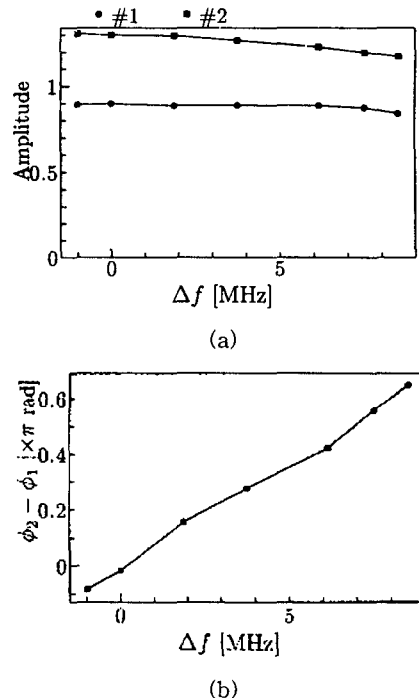


그림 14 안테나 개체의 진폭과 위상의 추정결과
 (a) 진폭, (b) 위상차
 Fig. 14 Assumed value of the single-element antenna
 (a) amplitude, (b) phase difference

4.3 양쪽 주입 위상 제어 방식

주입 신호원의 출력을 매직 T로 2분할하여 각각의 주입 신호의 한쪽에는 가동 단락기와 서큐레이터로 구성되는 이상기를 이용함으로써 주입 신호사이에 위상차를 발생시켰다. 이상기의 전력손실을 고려하여 반대 측에는 감쇄기를 부착하는 것으로 같은 전력이 주입되도록 보정하고, 2개의 신호를 아이솔레이터로 주입하였다. 안테나 #1의 바이어스전압을 $V_{GS} = -0.043[V]$, $V_{DS} = 6.01[V]$ 로 하면 발진주파수 f_1 은 8.45000GHz로 발진출력은 9.3mW, 결합선로에서의 출력은 1.7mW였다. 능동안테나 #2의 바이어스전압을 $V_{GS} = 0[V]$, $V_{DS} = 8.54[V]$ 로 하면 발진주파수 f_2 는 같은 8.45000GHz에서 출력이 9.3mW이고 결합선로에서의 출력은 1.8mW였다. 주입신호를 인가하지 않은 상태에서 능동안테나를 상호 동기시키면 동상으로 동기하고 상호 동기주파수는 8.44700GHz였다. 이 상태에서 2mW, 8.44700GHz의 주입신호를 각각 인가하고 주입신호의 위상 θ 를 변화시켜서 위상차배열 실험을 실시하였다. 그림 15 (a)에는 $\theta = 0$ 의 경우와 방사방향이 가장 정면방향에서 벗어난 경우의 방사패턴을 나타내고, 그림 15 (b)에는 방사패턴에서 구한 방사빔의 주사각을 나타냈다. 또, 개개의 능동안테나의 출력의 진폭과 위상차의 추정결과를 그림 16에 보였다. 그림 16(b)에서 빔의 방사방향은 약 -17° 에서 $+16^\circ$ 까지 33° 변화였다. 능동안테나 사이의 위상차는 -0.63π 에서 0.59π 까지 변하고 있으므로 위상차배열로 동작하고 있으나 상호 주입비 γ 의 값이 대단히 커져 있는 것을 알 수 있다

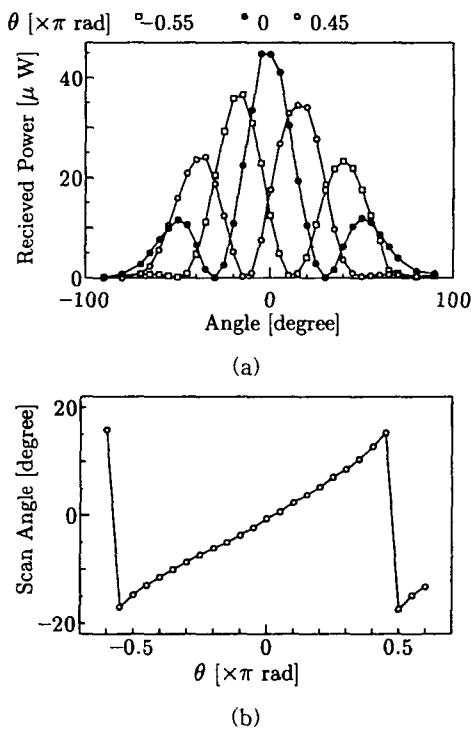


그림 15 양쪽 주입 위상제어방식의 위상차배열 동작 (a)방사패턴, (b) 주사각도

Fig. 15 Phase characteristics controlled by double side input (a) radiation pattern, (b) scanning angle

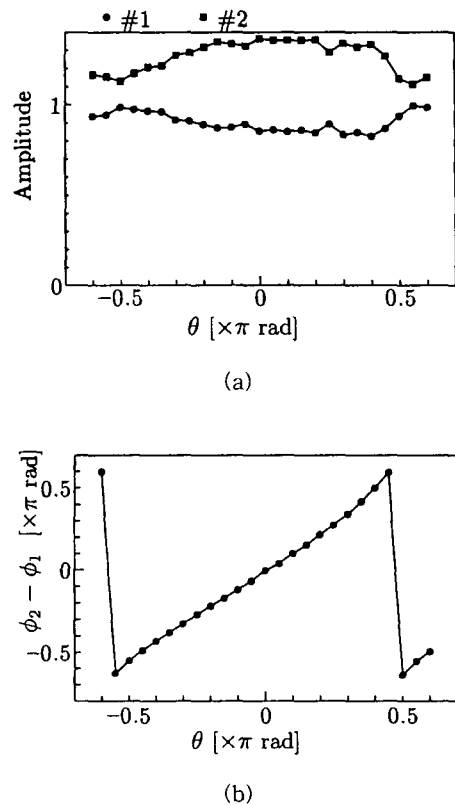


그림 16 양쪽 주입 위상제어방식의 위상차배열 (a) 진폭, (b) 위상차

Fig. 16 Phase characteristics controlled by the double side input, (a) amplitude, (b) phase difference

5. 결 론

전송선로로 결합된 능동안테나의 위상차배열 동작에 대하여 살펴보았다. 능동 안테나의 중심적인 구성 요소인 FET 발진기의 구성을 보이고 시험 제작한 발진기의 특성을 측정하였다. 능동 안테나를 전송선로로 결합시킨 경우의 결합위상을 조사하고 2요소 능동 안테나를 구성하여 위상차배열 동작의 실험을 실시하였다. 2개의 능동안테나에 주파수 차를 부여하는 방식, 한쪽의 능동안테나에 주입신호를 인가하고 다른 한 쪽에는 안테나의 고유주파수를 변화시키는 방식, 위상이 다른 주입신호를 능동안테나에 각각 인가하여 그 위상차를 변화시키는 방식의 3가지 구동방식에 대하여 실험을 실시한 결과 어떤 방식이라도 방사방향의 주사가 가능하다는 것을 확인하였다. 전송선로로 결합할 경우 결합의 크기나 위상이 안테나 사이의 거리에 의존하지 않게 되므로 안테나 구성의 자유도가 증가하면서도 고효율 고속주사가 가능한 능동 안테나의 위상차배열 동작이 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. F. White, "Diode phase shifters for array antennas", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.MTT-22, no.6, pp.658-674, Jun. 1994.
- [2] F. G. Terrio, R. J. Stockton, and W. D. Sato, "A low cost P-I-N diode phase shifter for airborne phased array antennas", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.MTT-22, no.6, pp.688-692, Jun. 1994.
- [3] J. Lin and T. Itho, "Active Integrated Antennas," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol. MTT-42, no.31, pp.2186-2194, Nov. 1994.
- [4] P. Liao and R. A. York, "A new phased-shifterless beam-scanning technique using arrays of coupled oscillators," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., MTT-41, pp. 1810-1851, Apr. 1993.
- [5] K. J. Russell, "Microwave power combine techniques", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.MTT-27, no.5, pp. 472-478, May 1979.
- [6] K. Chang and C. Sun, "Millimeter-wave power combine techniques", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.MTT-31, no.2, pp. 91-107, Feb. 1983.
- [7] Gong-ro Lin, T. S. Hwang, Y. H. Chuang, Y. H. Wnag and C. L. Pan, "Broad-band(20GHz) Laser diode based optoelectronic microwave phase shifter," IEEE Trans. Theory & Tech. vol. MTT-22, no. 6, pp. 1419-1426, Oct.
- [8] A. J. Seeds, "Microwave photonics," Microwave Theory Tech., vol. MTT-50, no.3, pp.877-887, Mar. 2002.
- [9] M. Sanagi, M. Kageyama, S. Nogi, and K. Fukui, "Frequency controlled phased array of coupled microwave with phased-locked end," Asia-Pacific Microwave Conf. Proceeding, 2, pp. 940-943, 1995
- [10] K. D. Stephan, "Inter-injection-locked oscillators for power combining and phased array," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., MTT-44, pp. 1017-1025, Jul. 1986.
- [11] J. Lin, S. T. Chew, and T. Itho, "A Unilateral Injection-Locking type active phased array for beam scanning", IEEE MTT. Int. Microwave Symp. Digest pp. Jul. 1994.
- [12] R. Adler, "A study of locking phenomena in oscillators", Proc. IRE, 34, pp. 351-357, 1946.

저 자 소 개



최영규(崔泳圭)

1955년 8월 26일생

1988년 교토대학(일본)대학원 전자공학과 졸업(석사), 1992년 동 대학원 공학박사, 1992년~1995년 국립 후쿠이대학 (일본) 전자공학과 전임강사, 1998년~현재 신라대학교 공과대학 광전자공학과 교수

Tel : 051-309-5622

Email : ykchoi@silla.ac.kr