

용량 조정형 능동 집적 배열 안테나의 제작과 방사 방향 주사 특성

論 文
56-10-18

Fabrication of the Capacitance Controlled Active Integrated Phased Array Antenna and It's Scanning Characteristics

崔 泳 圭[†] · 南 炳 根^{*} · 辛 相 烈^{*}
(Young-Kyu Choi · Beong-Geun Nam · Sang-Yeol Shin)

Abstract – This paper deals with extending the variable natural oscillation frequency range of an active integrated FET oscillator. In this paper, we conform experimentally that the variable range of the natural oscillation frequency is expanded about three times in the oscillator controlled by the varactor diode. When the frequency difference is given to the oscillators in the two element antenna system, phase difference appeared between the oscillators. The 2-, 3-, 4-, 5-element patch antenna arrays are composed for the beam scanning experiments. All the above patch antennas show good phased array characteristics. The range of the scanning angle is about 30°, and the radiation power is gradually increased from 50μW to 200μW. The radiation patterns are sharpened as the number of elements is increased.

Key Words : Active Integrated Oscillator, Array Antenna, Oscillator, Power-combine, Scanning Angle

1. 서 론

마이크로파와 밀리미터파의 이용 가치가 날로 증대됨에 따라서 고체 마이크로파나 밀리미터파원의 고속주사, 고출력화는 이 분야의 중요한 연구과제로 주목을 받고 있다[1-4]. 고체소자로 제작된 고주파 안테나의 방사출력 고출력화는 각 발진기에 안테나를 접속한 능동 안테나로 안테나 배열 (Antenna array)을 구성하여 그 출력을 공간상에서 합성하는 방법을 이용하고 있다[5-8].

이러한 발진기의 구성에는 FET를 이용한 루프 귀환형 발진기를 사용하고 있으나[9-12], FET만으로는 고유 발진주파수의 가변 범위가 매우 좁아서 만족할 만한 위상차 배열 동작을 얻을 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 루프 귀환형 발진회로에 바랙터 다이오드를 삽입하여 회로 용량을 조정함으로써 고유 발진주파수 가변범위의 확장 가능성을 살펴보았다. 게이트와 드레인 사이의 직류바이어스 전압에 의한 FET 발진기의 고유 발진주파수의 변화에 더하여, 귀환루프 중에 바랙터 다이오드를 병렬로 접속하여 가변할 수 있는 용량의 크기를 확장시키면 보다 넓은 주파수의 가변 폭을 얻을 수 있다.

먼저, 루프 귀환형 FET발진기의 귀환루프 중에 바랙터 다

이오드를 삽입한 발진기를 제작하여 가변 발진주파수의 범위의 확장 가능성 및 그 범위를 확인하였다. 그리고 바랙터 다이오드를 삽입한 발진기의 외부 Q를 측정하여 단방향 특성이 유지되는지를 확인하고, 2개의 발진기 결합계에 주파수차를 부여하여 발진기 사이에 위상차가 발생하는 것을 실험적으로 확인하였다.

바랙터 다이오드를 삽입한 발진기에 패치안테나를 접속하여, 3요소, 4요소, 5요소 어레이를 제작하고 방사 전자파 주사실험을 실시하였다. 방사패턴을 측정하여 제작한 배열 안테나가 정상적인 위상차 배열동작을 하고 있는지를 살펴보았다.

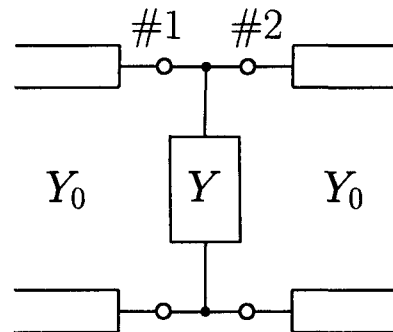


그림 1 바랙터 병렬접속 전송선로 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of the transmission line which is connected parallel by admittance Y

[†] 교신저자, 正 會 員 : 新 羅 大 學 校 電 子 工 學 科, 교수

E-mail : ykchoi@silla.ac.kr

^{*} 正 會 員 : 신라대학교 박사과정

接受日字 : 2007年 6月 8日

最終完了 : 2007年 8月 9日

2. 용량 조정 루프 귀환형 발진기

바랙터 다이오드를 병렬로 접속한 발진기의 등가회로를 그림1에 보였다. 바랙터 다이오드는 역바이어스 전압(V_r)으로 소자의 용량을 변화시킬 수 있으므로 귀환 루프 중 전체의 전파 위상을 FET의 바이어스에 더하여 V_r 에 의해서도 제어할 수 있다. 그림 1처럼 바랙터 다이오드의 어드미턴스 Y 를 특성어드미턴스 Y_0 의 전송선로에 병렬로 접속한 경우, 등가회로의 산란행렬은

$$[S] = \frac{1}{Y + Y_0} \begin{bmatrix} -Y & 2Y_0 \\ 2Y_0 & -Y \end{bmatrix} \quad (1)$$

로 된다. 여기서 Y 는 바랙터 다이오드의 어드미턴스로 인덕턴스 L 과 용량 C 의 직렬접속이다.

특성임피던스 50Ω 의 선로는 $Y_0 = 0.02[S]$ 이므로 반사계수 $S_{11}(=S_{22})$, 투과계수 $S_{21}(=S_{12})$ 는 각각

$$S_{11} = \frac{-625 + j25\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{625 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2)$$

$$S_{21} = \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + j25\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{625 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3)$$

이 된다. 바랙터 다이오드의 삽입에 의해서 전력의 반사기생기는 동시에 전파 위상은 바랙터 다이오드의 용량 C 에 의해 변하는 것을 알 수 있다.

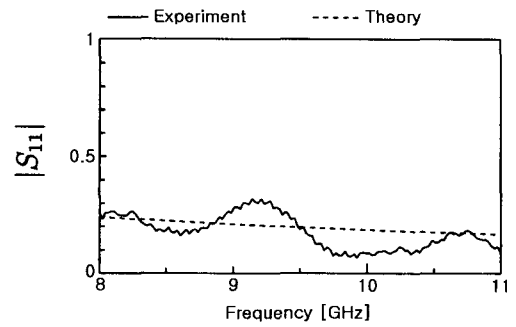
Duriod5870 기판(두께 0.508mm, 비유전율 2.33)으로 50Ω 의 마이크로스트립 선로(폭 1.52mm, 길이 50mm)를 제작하여 바랙터다이오드($V_r=0[V]$ 에서 1.344pF, $V_r=30[V]$ 에서 0.445pF)를 접속한 후 S-파라미터를 측정하였다.

바랙터 다이오드의 L값을 추정하기 위하여 측정된 S_{11} 과 식(3)에서 계산한 S_{11} 이 될 수 있는 대로 가깝게 되도록 $L=2.3[nH]$ 로 정했을 때, 주파수 변화에 대한 S_{11} 측정결과를 그림 2에 보였다. 회로망 분석기로 측정한 S_{21} 에는 마이크로스트립 선로의 전파위상이 포함되므로 V_r 가 0[V]와 30[V]에서 S_{21} 의 위상차를 이론치와 비교한 결과를 그림 3에 보였다. 측정치에서 전파 위상은 9.7GHz에서 0.028π 변하고 이론치에서는 0.041π 변하였다. 다소 차가 발생하였으나 그 원인은 바랙터 다이오드를 L과 C 만으로 근사한 데 있는 것으로 판단된다.

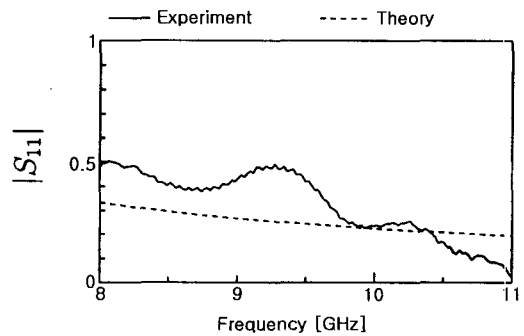
3. 발진기의 제작 및 동기특성

3.1 발진기 제작

루프귀환형 FET발진기에 바랙터 다이오드를 삽입하여 제작한 발진기를 그림 4에 보였다. FET 소스 단자는 기판에



(a) $V_r = 0[V]$



(b) $V_r = 30[V]$

그림 2 S_{11} 의 이론치와 측정치의 비교

Fig. 2 Comparison of theory and measured value of S_{11}

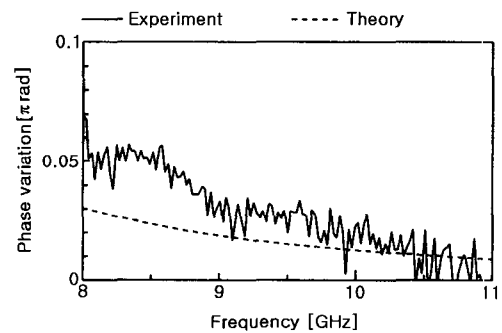


그림 3 위상변화의 비교

Fig. 3 Comparison of phase variation

구멍을 뚫어 뒷면의 접지 도체에 접속하고, 폭 0.2mm의 바이어스 선로를 이용하여 드레인, 게이트 및 바랙터 다이오드의 음극에 직류 바이어스를 공급하였다. 바이어스 선로에는 1/4 파장 위치에 반경 1/4파장의 부채형 쇼크(Radial choke)를 설치하여 고주파의 영향을 차단하였다. 다른 회로 소자에 대한 직류 바이어스의 영향을 막기 위해서는 직류 저지회로가 3개 소 필요하다. 그러나 방향성결합기의 2개 포트를 개방시킨 회로에서는 1/4파장의 길이가 필요하기 때문에 회로가 커지게 된다. 따라서 본 연구에서는 마이크로스트립 선로에 0.6mm 간격을 설정하여 3pF의 칩용량을 접속하여 직류 저지

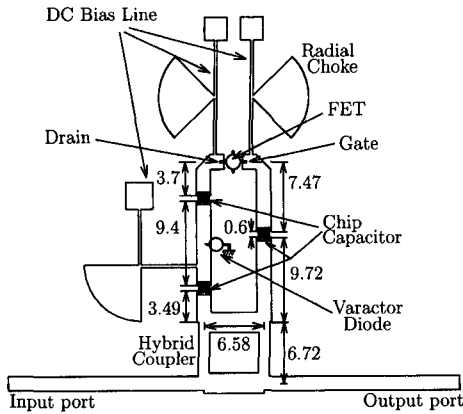
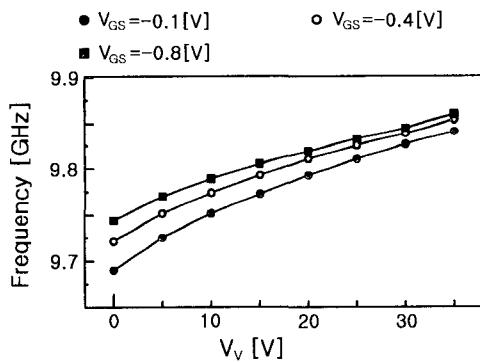
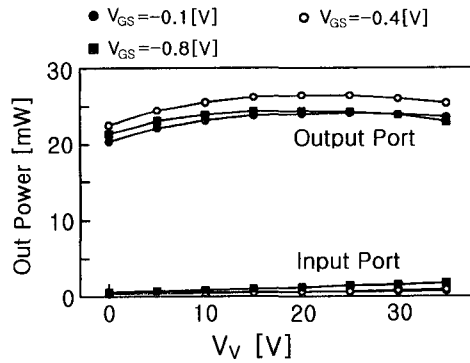


그림 4 바랙터를 삽입한 루프 귀환 발진기의 구조 (단위:mm)
 Fig. 4 Loop feedback oscillator controlled by varactor diode (scale : mm)

회로를 구성하였다. 루프의 길이는 9.7GHz에서 위상변화가 4π 로 되도록 하였다. 제작한 발진회로의 동작특성을 그림 5에 보였다. 바랙터 다이오드를 삽입하지 않은 발진기의 가변범위는 50MHz 였으나, 바랙터 다이오드를 삽입한 후에는 V_v , V_{GS} 를 제어함으로써 출력전력의 변화를 억제하면서도 발진주파수를 170MHz까지 변화시킬 수 있었다. 출력전력은 대부분 출력포트로 출력되었으며 단방향성도 그대로 유지되었다.



(a) frequency



(b) power

그림 5 발진기의 특성
 Fig. 5 Characteristics of the oscillator

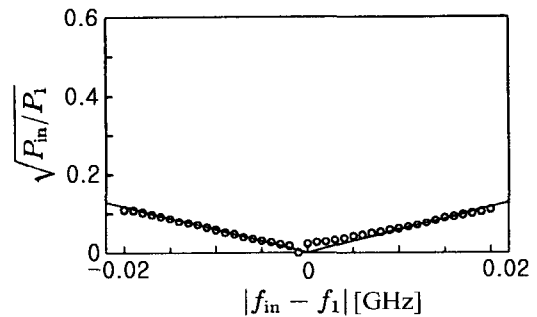
3.2 발진기의 동기특성

발진기의 동기특성을 파악하기 위하여 발진기의 외부 Q를 측정하였다. 외부 Q가 크다는 것은 발진기가 주입신호에 대해서 동기하기 어렵다는 것을 나타낸다. 자려 발진주파수 f_1 , 출력포트의 출력전력 P_1 으로 발진하는 FET발진회로에 주파수 f_{in} , 주입전력 P_{in} 의 주입신호를 외부발진기로 인가하였다. 주입동기 한계에서의 주파수차를 $|f_{in} - f_1|$ 라 하면, 발진기의 Q_{ex} 는 Adler의 방정식[13]에서

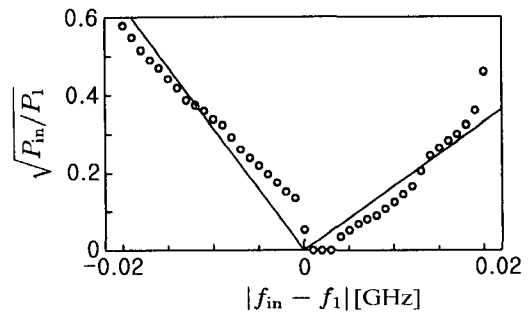
$$\frac{|f_{in} - f_1|_{\max}}{f_1} = \frac{1}{Q_{ex}} \sqrt{\frac{P_{in}}{P_1}} \quad (5)$$

이 된다. 주입동기가 일어나는 것을 확인하면서 주입신호전력을 감소시켜 주입동기에서 벗어나기 직전의 주입신호전력을 측정하였다.

그림 6의 직선은 원점을 통하도록 측정치를 직선 근사한 것이다, 그림에서 $(f_{in} - f_1)_{\max}$ 가 양일 때와 음일 때의 평균을 취하면, 입력포트에서 주입한 경우 외부 Q는 약 61.6, 출력포트에서 주입한 경우의 외부 Q는 약 237이었다. 외부 Q의 측정으로 입력포트로 주입하는 것이 동기하기가 쉬우므로 단방향성을 유지하고 있다는 것을 알 수 있다.



(a) input port



(b) output port

그림 6 주입동기특성
 Fig. 6 Characteristics of injected synchronization

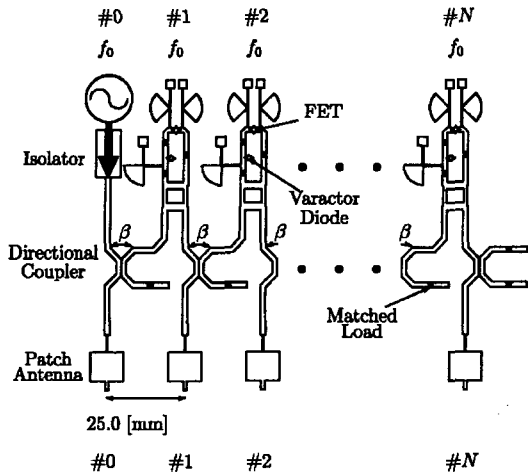


그림 7 배열안테나 발진기 결합계의 구성
Fig. 7 Composition of array antenna oscillator system

4. 발진기의 배열 동작 실험

4.1 배열 안테나의 구성

능동 안테나배열을 루프 귀환형 발진기와 구형 패치안테나를 이용하여 그림 7처럼 구성하였다. 루프 귀환형 FET 발진기의 출력포트에 패치안테나를 접속하고 그 사이에 다음 단의 발진기의 입력포트와 결합시키기 위하여 방향성결합기를 삽입하였다. 발진기의 입력포트는 입력포트의 출력이 다른 부분에 영향을 미치지 않도록 정합을 취하였다. 방향성 결합기는 -14dB 로 되도록 설계하였다. 안테나 #N에는 다음 단의 안테나는 없으나 각 안테나 방사패턴의 최대전력을 모두 모으기 위하여 여기에도 방향성 결합기를 삽입하여 다음 단의 안테나에 연결하는 부분은 발진기의 입력포트와 함께 정합 중단시켰다. 종단의 특성임피던스 50Ω 과 동일한 칩 저항을 선로 중에 삽입하고, 칩저항에서 $1/4$ 파장 떨어진 곳을 개방시켰다.

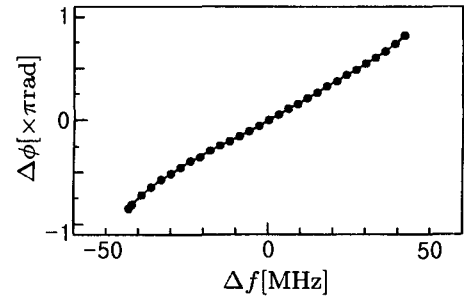
발진기 #0는 외부 발진기를 이용하여 결합회로와의 사이에는 아이솔레이터를 삽입하였다. 안테나 간격은 25mm 로 하고 발진기 사이의 결합선로의 길이는 모든 발진기의 고유발진주파수를 일치시켰을 때 전자파의 방사방향이 정면방향을 향하도록 실험적으로 정하였다.

위상차 배열 동작의 측정에는 포트 0과 포트 1에 네트워커 널러이저를 접속하여 발진기 사이의 위상차 $\Delta\phi(=\phi_1 - \phi_2)$ 를 측정하였고, 발진기 #1의 출력을 측정하는 경우는 파워미터를 포트 1에 접속하였다.

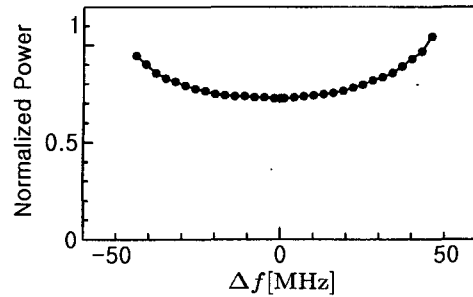
4.2 배열 안테나의 동작특성

발진기 #1의 FET 전압이 $V_{DS}=3.5\text{[V]}$, $V_{GS}=-0.4\text{[V]}$, $V_V=15\text{[V]}$ 일 때, 발진주파수 $f_1=9.774\text{GHz}$ 에서의 출력이 18.4mW 였으므로 발진기 #0의 출력을 18.4mW 로 조정하였다. 발진기 #1에 주파수차 Δf 를 부여하는 방법은 발진기 #1의 고유주파수 $f_1=f_0+\Delta f$ 는 일정, 발진기 #0의 주파수 $f_0=f_1-\Delta f$ 를 변화시키는 방법과, 발진기 #0의 주파수 f_0 고정하고 발진기 #1의 고유주파수 $f_1=f_0+\Delta f$ 를 변화시키는

방법이 있다. 전자의 방법으로 측정된 결과를 그림 8에 보였다. 출력전력은 자려시의 출력 18.4mW 로 규격화하였다. 위상차는 상대치가 측정되는 것이기 때문에, $\Delta f=0$ 일 때 $\Delta\phi=0$ 이 되도록 나타냈다. 발진기 사이의 위상차는 -0.85π 에서 0.82π 까지 변화였다. 한편, 발진기 #0의 주파수를 $f_0=9.774\text{[GHz]}$ 로 고정하고 발진기 #1의 V_{GS} 와 V_V 를 조정하여 위상과 출력을 측정 후자의 결과에서도 그림8과 거의 일치하는 특성을 나타냈으며, 발진기 사이의 위상차는 -0.52π 에서 0.59π 까지 변하는 배열동작을 하고 있음을 확인하였다.



(a) phase



(b) power

그림 8 위상차 배열 동작특성(발진기 #1 : 9.7742 GHz , 발진기 #0 : 9.7742 GHz 에서 $-\Delta f$ 만큼 변화)

Fig. 8 Characteristics of phased array operation (osc.#1 : 9.7742 GHz , osc.#0 : $-\Delta f$ from 9.7742 GHz)

각 배열요소 안테나의 고유주파수의 가변범위의 중심이 일치하도록 발진 주파수를 설정하였다. 안테나 각각의 방사패턴의 최대 수신전력이 각 안테나에서 동일하게 되도록 발진기 #0의 출력전력을 조정하였다. 모든 배열요소의 V_{DS} 는 약 4.2[V] 에서 5.0[V] 범위, $V_{GS}=-0.42$, V_V 는 5.0[V] 에서 15[V] 의 범위 사이에서 조정되었다. 능동안테나 #1, #2, #3, #4의 고유주파수의 가변 범위의 중심 주파수는 9.71GHz 였으므로 발진기 #0의 발진주파수를 동일하게 9.71GHz 로 하였다. 안테나 개체의 방사패턴의 최대 수신전력이 안테나 #0, #1, #2, #3, #4 에서 동일하게 되도록 발진기 #0의 출력전력을 24.5mW 로 하였다. 측정된 2, 3, 4, 5요소 배열안테나 방사패턴을 그림 9에 보였다. 각 배열 요소 안테나의 방사패턴이 약간씩 다른 것은 다른 회로요소, 예를 들어 안테나 부근의 방향성 결합기, 다음 단의 안테나, 기관 단면에서의 불필요한 방사 등이 원인으로 판단된다.

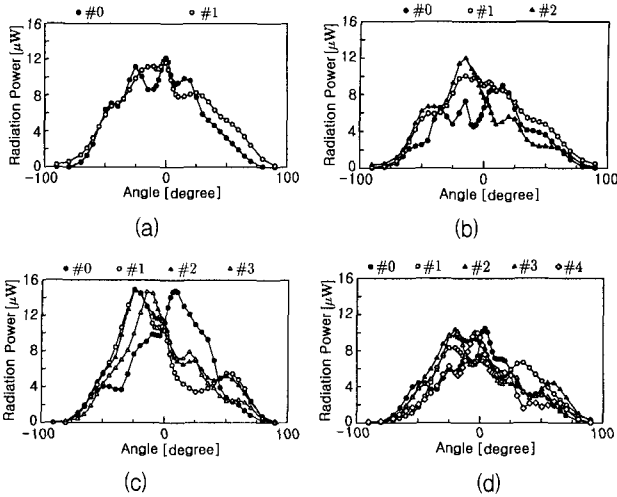


그림 9 여러 배열에 포함된 1개 안테나 방사패턴 (a) 2배열, (b) 3배열, (c) 4배열, (d) 5배열

Fig. 9 Radiation pattern of single antenna element (a) 2-elements, (b)3-elements, (c) 4-elements, (d) 5-elements

5. 방사방향의 주사 실험

발전기 #0의 주파수를 고정하고 능동안테나 배열 #1, 배열 #2, 배열#3, 배열#4의 바이어스전압 V_{GS} , V_V 를 제어하여 Δf 를 변화시켰다. 주파수차 Δf 를 0으로 한 경우와 동기 한계까지 변화시킨 경우에 대하여 그림 10에 2배열, 그림11에 3배열, 그림12에 4배열, 그림13에 5배열의 방사패턴을 보였다. 방사 패턴에서 안테나 사이의 위상차를 추정하여 위상차를 산출하였다. 각 배열요소의 방사각, 위상차, 방사출력을 측정 한 결과는 표1과 같다.

표 1 위상차 배열동작 방사특성 측정결과

Table 1 Radiation characteristics of phased array antenna

측정량 요소	방사각(°)	위상차	방사출력(μW) ($\Delta f=0$ 기준)
2 요소	-15.4~13.2 (28.6)	0.94π	50
3 요소	-16.7~12.3 (28.0)	0.87π	70
4 요소	-11.5~15.9 (27.4)	0.76π	165
5 요소	-13.6~12.6 (26.2)	0.74π	220

배열요소가 증가할수록 방사각은 예리해지면서 방사출력이 증가하는 것으로 보아 정상적으로 위상차 배열동작을 하고 있음을 알 수 있다.

한편, 능동 안테나 배열 #1, 배열#2, 배열#3, 배열#4의 주파수를 고정하고 발전기 #0의 주파수를 조정하여 Δf 를 변화시켜 방사패턴을 측정 한 실험에서도 개개 안테나의 방사특성은 약간씩 달랐지만 전체적인 동작특성은 표1과 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

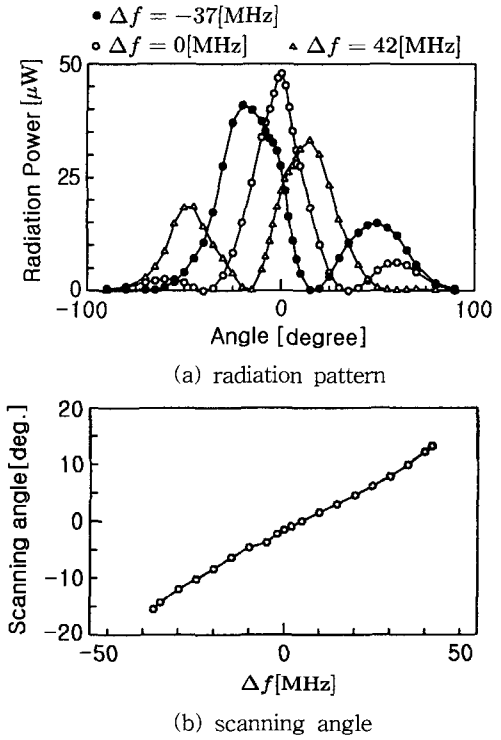


그림 10 2배열 요소 동작 특성(안테나 #1 : + Δf 변화)

Fig. 10 Characteristics of 2-elements array (antenna #1 : + Δf variation)

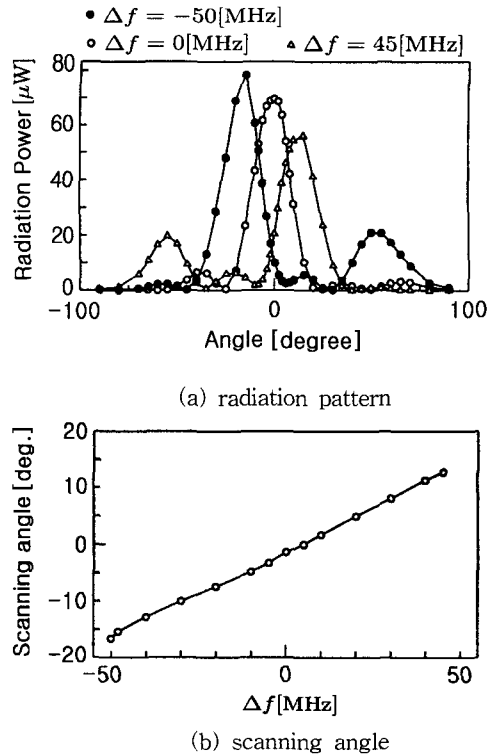


그림 11 3배열요소 동작 특성(안테나 #1, #2: + Δf 변화)

Fig. 11 Characteristics of 3-elements array (antenna#1, #2 : variation)

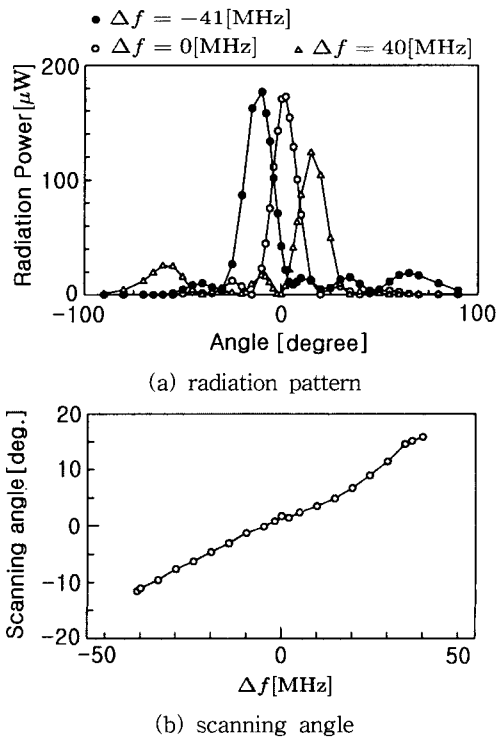


그림 12 4배열요소 동작특성(안테나 #1, #2, #3 : + Δf 변화)
 Fig. 12 Characteristics of 4-elements (antenna #1, #2, #3 : + Δf variation)

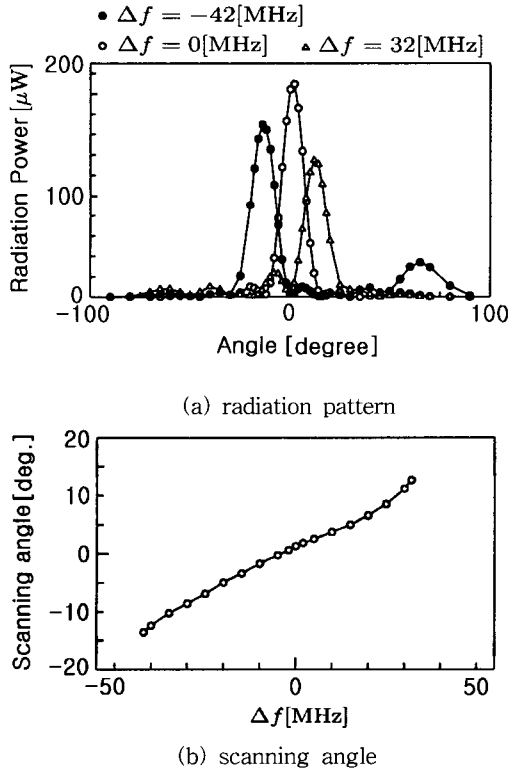


그림 13 5배열요소 동작 특성(안테나 #1, #2, #3, #4 : + Δf 변화)
 Fig. 13 Characteristics of 5-elements (antenna #1, #2, #3, #4 : + Δf variation)

6. 결 론

용량 조정형 루프 귀환형 FET 발진기를 제작하고 배열을 구성하여, 가변 주파수 범위의 확장 가능성과 방사방향 주사 특성을 살펴보았다. 시험 제작된 단방향 결합계의 발진기에 주파수 변화를 부여함으로써 정상적으로 위상차 배열 동작이 되는 것이 확인되었다. 바랙터 다이오드를 삽입한 발진기의 특성을 조사한 결과, 바랙터 다이오드의 삽입 전에는 출력전력의 변화가 작은 범위 내에서 고유발진주파수의 가변범위는 50MHz 정도였으나, 바랙터 다이오드를 삽입한 경우는 V_V , V_{GS} 에 의한 제어로 출력전력의 변화를 억제함과 동시에 발진 주파수를 170MHz까지 3배 이상의 넓은 범위로 가변시킬 수 있었다. 또한, 발진기의 외부 Q를 산출해서 발진계가 단방향의 동작 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 2요소 발진기 결합계의 방사특성을 측정된 결과, 양호하게 위상차 배열 동작을 하고 있음을 알 수 있었다. 발진기에 패치안테나를 접속하여 능동안테나로 3요소, 4요소, 5요소 안테나를 구성하여 방사전력을 주사하는 실험을 실시한 결과, 배열요소가 증가할수록 방사출력이 증가하면서 방사패턴이 예리해지는 정상적인 위상차 동작을 하고 있음이 확인되었다.

이후의 과제로는 실용이 가능한 정도로 주파수 가변의 범위를 확장시키는 것과 각 배열 안테나 특성의 균일화 및 배열 동작시의 출력 향상을 위한 연구를 진행시킬 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] J. Lin and T. Itoh, "Active integrated antennas", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol 42, no. 12, pp. 2186-2194, Dec. 1994
- [2] R. A. York and T. Itho, " Injection- and phase-locking techniques for beam control," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.46, no.11, pp.1920-1929, Nov. 1998
- [3] T. Ohira, " Microwave signal processing and devices for adaptive beamforming," IEEE AP-S Int. Symp. 2000 Dig., vol2, pp. 583-586, salt Lake City, UT, July 2000.
- [4] K. Chang and C. Sun "Millimeter-wave power-combining techniques", IEEE Trans .Microwave Theory & Tech.,vol.MTT-31, no.2, pp. 91-107, Feb. 1983.
- [5] L. W. Mink, "Quasi-optical power combining of solid-state millimeter-wave sources", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol. MTT-34, no.2, pp. 273-279, Feb. 1986.
- [6] H. Kondo, M. Hieda, M. Nakayama, T. Tanaka, and K. Mizuno, "Millimeter and submillimeter wave quasi-optical oscillator with multi-elements", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.MTT-40, no.5, pp. 857-863, Nov..1992.
- [7] S. Tanaka, S. Nogi, K. Fukui, and Y. A. In, "Crucial factors in power combining by oversized cylindrical cavity multiple device structure", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.MTT-37, no.11, pp.

- 1755-1760, Nov. 1989.
- [8] J. Lin and T. Itho, " Active Integrated Antennas," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol. MTT-42, no. 31, pp.2186-2194, Nov. 1994.
- [9] J. Lin, S. T. Chew, and T. Itho, " A Unilateral Injection-Locking type active phased array for beam scanning", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest 2, pp. 1231-1234, Jul. 1994.
- [10] J. Birkeland and T. Itho, "Two-port FET oscillators with applications to active array", IEEE Microwave Guided Wave Lett. no.1, pp. 112-113, May, 1991.
- [11] J. F. White, "Diode phase shifters for array antennas", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.,vol.MTT-22, no.6, pp.658-674, Jun. 1994.
- [12] A. J. Seeds, "Microwave photonics, Microwave Theory & Tech.", vol. MTT-50, no.3, pp.877-887, Mar. 2002.
- [13] R. Adler, " A study of Locking phenomena in oscillator", Proc. IRE, 34, pp. 351-357, 1946.

저 자 소 개



최영규(崔泳圭)

1955년 8월 26일생
 1988년 교토대학(일본) 대학원 석사
 1992년 동 대학원 공학박사
 1992년~1995년 국립 후쿠이대학(일본)
 전자공학과 전임강사
 1998년~현재 신라대학교 전자공학과 교수
 주요연구분야 : 광통신시스템 설계, 초고주파 디바이스설계,
 MMIC, 전자파 해석, 광도파로, 광변복조,
 안테나
 Tel : 051-309-5622,
 Email : ykchoi@silla.ac.kr



신상열(辛相烈)

1998년 동서대학교 전자공학과 학사
 2004년 동서대학교 전자공학과 석사
 2007년 신라대학교 대학원 신기술응용시스템공학과 박사과정 재학중
 주요연구분야 : RF를 이용한 디지털 통신, 원격계측, 광데이터전송
 E-mail : greenism72@hotmail.com



남병근(南炳根)

1983년 인하대학교 전자공학과 학사
 2003년 동아대학교 산업대학원 석사
 2004년~현재 신라대학교 대학원 신기술시스템응용공학과 재학
 1997년~현재 대진정보통신고등학교 교사
 주요연구분야 : 전자파 해석, 고주파 발진기, 배열안테나, RF를 이용한 디지털 통신, 원격계측