

Injection locking 기법을 이용한 GaAs FET 능동 단일 마이크로스트립 패치 안테나의 설계 및 제작

正會員 李斗漢*, 洪義錫**

A Design and Fabrication of the GaAs FET Active Single Microstrip Patch Antenna with Injection locking technique

Du Han Lee*, Ui Seok Hong** Regular Members

要 約

본 논문에서는 GaAs FET 소자를 이용한 Injection-Locking Oscillator(ILO)를 Microstrip Patch Antenna(MPA)에 집적화하여 injection-locking Active Microstrip Patch Antenna(AMPA)를 설계 및 제작하였다. AMPA의 최적화된 회로 설계를 얻기 위하여 Microwave Design system(MDS)로 시뮬레이션 하였다. 제작된 AMPA의 injection-locking한 출력 스펙트럼은 free-running한 상태에 비해 더욱 더 안정하게 동작됨을 확인하였다. 방사패턴을 측정하여 AMPA와 MPA를 비교 분석하였다. 이와같은 기법으로 제작된 AMPA는 beam forming 및 beam steering이 가능한 Active Phased-Array Antenna에 유용하다.

ABSTRACT

In this paper, the injection-locking Active Microstrip Patch Antenna(AMPA), which was integrated by the Injection-Locking Oscillator(ILO) with GaAs FET and the Microstrip Patch Antenna(MPA), was designed and fabricated. The optimized circuit design of AMPA was simulated by Microwave Design system(MDS). The power spectrum of this injection-locking AMPA is much more stable than that of the free-running AMPA. The AMPA and the MPA were compared and analyzed by the measurement of radiation pattern. The AMPA, which was fabricated with ILO and MPA, is useful for the Active Phased-Array Antenna(APAA) in the beam forming and beam steering.

*광운대학교 전자통신공학과

**광운대학교 전자공학과/신기술연구소 연구원

論文番號 : 95229-0703

接受日字 : 1995年 7月 3日

I. 서론

초고주파용 소형안테나로서는 안테나 구조상 제조 공정이 쉽고 가격이 저렴하며 소형 경량으로 유전체 기판 위에 집적화하여 대량생산이 가능한 Microstrip Patch Antenna(MPA)가 널리 이용되고 있다⁽¹⁾⁻⁽²⁾. 최근에는 초고주파 능동소자와 Microwave Integrated circuit(MIC)의 기술발달로 인해 안테나의 크기와 손실을 감소시키며 회로 구성을 간단히 하기 위해 MPA에 FET 또는 Diode 등과 같은 능동소자를 동일한 유전체 기판상에 집적화하는 방법이 활발히 연구되고 있다. 안테나와 능동소자인 source를 하나의 평면상에 구현할때 패치는 복사소자 뿐만아니라 능동소자의 발진 주파수를 안정화하기 위한 공진기로서 사용된다⁽³⁾⁻⁽⁶⁾.

본 논문에서는 복사소자와 공진기로 사용된 MPA와 부성 저항 FET 발진기의 설계 기법에 기초를 한 Injection Locking Oscillator(ILO)를 이용하여 Active Microstrip Patch Antenna(AMPA)를 설계 제작하였다⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾.

MPA는 Modal-expansion 공진기 모델로써 이론적으로 해석한 뒤⁽⁷⁾, Pozar의 MSANT 프로그램을 이용하여 설계하였으며⁽⁸⁾, 능동소자인 발진기 부분은 전송형 ILO로서 Kurokawa에 의해 제안된 부성저항 ILO 이론을 기초로하여 M/W 상용 CAD인 Hewlett Packard(HP)사의 Microwave and Design System(MDS) package로써 모델링 하였다⁽⁹⁾. 설계된 MPA와 ILO를 이용하여 MPA의 공진주파수와 ILO의 발진 주파수가 일치하도록 최적화된 AMPA 회로를 MDS package로 설계하여 제작하였다.

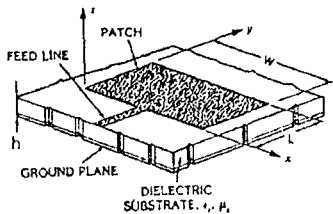


그림 1. MPA의 구조
Fig. 1. Configuration of the MPA

II. 마이크로스트립 패치 안테나의 해석

본 논문에서는 안테나의 방사소자 뿐만아니라 발진기의 공진기로 사용된 패치 안테나를 임의의 모양에 적용될 수 있는 Modal expansion 공진기 모델을 이용하여 해석하였다⁽⁷⁾. 이 모델은 방사벽인 패치를 얇은 자계벽(magnetic wall)을 갖는 TMz 모드 공진기로 간주하여 해석한 것이다.

그림 1과 같이 접지면위에 두께가 h이고 유전율 상수 εr을 갖는 기판상에 복사기 역할을 하는 폭이 W, 길이가 L인 단일 마이크로스트립 패치가 있다. 기판의 두께가 파장에 비해 아주 얇고 마이크로스트립 패치 주의가 완전한 자계 도체로 둘러 쌓여져 있다고 가정하면 마이크로스트립 선로와 접지면 사이의 영역에 의해 형성된 공진기내의 전계는 z성분만을 갖게되며 이때 모드의 합수에 의해 전계 Ez를 표현하면 다음과 같다.

$$E_z = j k I_0 Z_0 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\phi_{mn}(x, y) \phi_{mn}(x_0, y_0)}{k^2 - k_{mn}^2} G_{mn} \quad (1)$$

여기서, $k^2 = \epsilon_r (1 - j \tan \delta) k_0^2$, $k_{mn}^2 = \omega_{mn}^2 \sqrt{\mu \epsilon}$

$$\cong \left(\frac{m\pi}{W} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2$$

$\tan \delta$: 유전체의 탄젠트 손실

$$\begin{aligned} \phi_{mn}(x, y) &= \frac{\chi_{mn}}{\sqrt{LW}} \cos k_n x \cos k_m y \\ &\cong \frac{\chi_{mn}}{\sqrt{LW}} \cos \frac{n\pi x}{W} \cos \frac{m\pi y}{L} \\ G_{mn} &= \text{sinc} \left(\frac{n\pi dx}{2W} \right) \text{sinc} \left(\frac{m\pi dy}{2L} \right) \end{aligned}$$

TM₁₀ 모드로 인가되는 패치 안테나의 길이는 기판의 반파장보다 작으며 이 경우에 k_m = 0이고 공진주파수에 대한 표현식은 다음과 같다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{ck_{10}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

두께 h와 신호가 인가되는점 y₀/L로 계산되는 패치의 방사저항과 급전점에서 패치의 입력 임피던스는 다음과 같다.

$$R_{rad} = \frac{Q_{rad}}{\omega_r C_{10}} = \frac{Q_{rad}}{2\pi f_r C_{10}} \quad (3)$$

$$R_{i_s} = R_{rad} \cos^2 \left(\frac{\pi y_0}{L} \right) \quad (4)$$

여기서, $Q_{rad} = \frac{Re(k_{10})}{2Im(k_{10})}$, $C_{10} = \frac{1}{2} C_{dc} \cos^{-2}(-\frac{\pi V_0}{L})$,

$$C_{dc} = \frac{\epsilon WL}{h} \quad ; \quad \text{패치의 dc 캐패시턴스}$$

TM₁₀ 모드로 동작되는 패치 안테나의 방사패턴은 다음과 같다.

$$F_E(\theta) = \cos\left(k_0 \frac{L}{2} \sin \theta\right) \tag{5}$$

$$F_H(\theta) = \frac{\sin\left(k_0 \frac{W}{2} \sin \theta\right)}{k_0 \frac{W}{2} \sin \theta} \cos \theta \tag{6}$$

Ⅲ. Injection-locking 발진기 이론

부성저항 Injection-Locking Oscillator(ILO)에 관한 이론은 1973년도 Kurokawa에 의해서 정립되었는데 일반적으로 ILO는 free-running 발진기의 입력단에 locking 신호인 외부 RF신호를 인가함으로써 안정된 신호를 얻을 수 있다. 외부에서 공급되는 locking RF신호는 일반적으로 출력신호보다 10dB정도 낮은 신호레벨로 인가되어 발진기는 locking 대역폭내에서는 안정화되면서 그 출력레벨도 증폭되는 장점이 있다⁹⁾.

본 논문에서는 Tajima와 Mishima에 의해 제안된 transmission type ILO를 적용하였다. transmission type ILO는 GaAs FET와같은 능동소자에 적용하기가 용이하며 RF power 출력단과 locking signal 입력단이 분리되어 있기 때문에 reflection type에 비하여 보다 넓은 locking range 등 우수한 성능을 갖고 있다. 그림 2는 전송형 ILO의 구조를 나타낸 것이다.

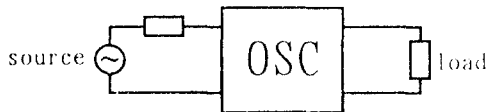


그림 2. 전송형 ILO의 구조
Fig. 2. Transmission type of the ILO

일반적인 2단자 ILO구조에서 외부신호에 의해서 oscillator가 injection-locking될때 free-running

한 신호와 injected 되는 외부 신호간에는 $\Delta \phi$ 만큼의 위상 차이가 생기며 최대 위상차는 $\pm 90^\circ$ 이다.

$$\Delta \phi = \sin^{-1}\left(\frac{\omega_f - \omega_o}{\Delta \omega_m}\right)$$

여기서, ω_f 는 free-running oscillator의 주파수이고 ω_o 는 injection 신호의 주파수이다. 또한 이 경우에 최대 locking range는 다음과 같다.

$$\Delta \omega_m = \frac{\omega_o}{Q_{ext}} \frac{G_s}{G_p} \sqrt{\frac{P_i}{P_o}} \frac{1}{\sin \alpha}$$

여기서, Q_{ext} 는 공진회로의 외부 양호도이고 G_s 는 2단자 회로의 최대 안정도 이득, G_p 는 2단자 회로의 출력 전력에 대한 평방근, P_o 는 ILO의 출력 전력, P_i 는 injection 신호의 출력전력이며 α 는 회로의 임피던스 궤적에 수직인 방향과 소자의 임피던스 궤적간의 경사각이다. 이때 locking 대역폭은 $2\Delta \omega_m$ 이다.

Ⅳ. 설계 및 제작

제 1 절. MPA의 설계 및 제작

MPA의 초기 모델링은 Modal expansion 공진기 모델 해석 방법을 기초로한 Pozar의 MSANT program을 사용하여 설계하였다⁸⁾.

패치의 공진길이 L과 폭 W를 전송선로 모델을 이용하여 대략적인 크기를 미리 결정한 뒤 급전선로의 특성 임피던스와 패치의 입력 임피던스가 정합되는 점에서 원하는 공진 주파수인 11GHz에 따른 패치의 공진길이 L과 폭 W를 결정하였다.

표 1은 Pozar의 MSANT program을 사용하여 설계한 MPA에 대한 설계값을 나타낸 것이다. 설계시 사용된 유전체 기판은 일본 Chukoh사의 Teflon $\epsilon_r = 2.52$, $h=0.05\text{cm}$ 을 사용하였다. 마이크로스트립 급전선로의 설계는 MPA와 급전선로의 임피던스정합 및 급전선로간의 임피던스를 정합시키기 위해서 $\lambda_g/4$ 변환기를 사용하였다. 그림 3은 설계 제작된 MPA의 구조를 나타낸 것이다.

제 2 절. ILO의 설계

일반적으로 초고주파 발진기를 설계하는 과정은 제조 회사에서 주는 데이터 시트상의 S-parameter로부터

표 1. 설계된 MPA의 제원
Table 1. Parameters of the designed MPA

ϵ_r	h	L	W	fr	$\tan\delta$	R_{IN}	R_r	대역폭
2.52	0.05cm	0.81cm	0.81cm	11GHz	0.0018	247 Ω	247 Ω	3.00%

$Z_T=111.2\Omega$	$L_T=4.67\text{mm}$	$W_T=0.3\text{mm}$
$Z_0=50\Omega$	$L_0=4.65\text{mm}$	$W_0=0.14\text{mm}$

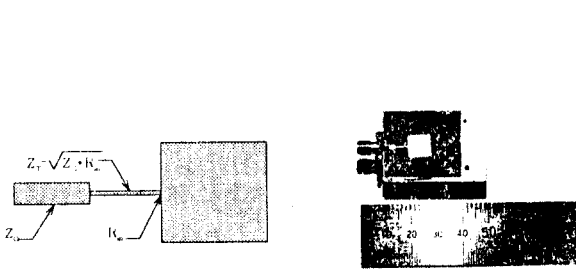
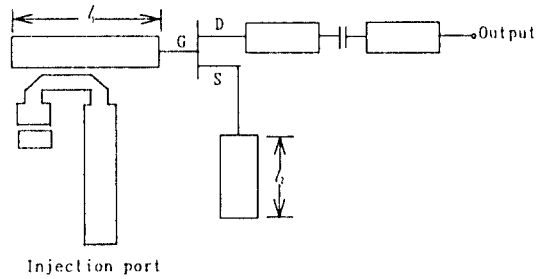


그림 3. 설계 제작된 MPA
Fig. 3. Designed and fabricated for the MPA



gate stub	$l_1=11.1\text{mm}$	$w_1=1.5\text{mm}$
source stub	$l_2=5.2\text{mm}$	$w_2=2\text{mm}$

그림 4. 설계된 ILO의 구조
Fig. 4. Configuration of the designed ILO

스미스 도표(smith chart)상에서 부성저항을 갖는 발진기의 설계로 시작된다. 본 논문에서는 이와같은 이론을 기초로하여 M/W용 상용 CAD인 HP사의 MDS를 이용하여 전송형 ILO를 설계한 뒤 시뮬레이션하였고 최적화를 하여 원하는 주파수에서의 마이크로스트립 선로의 폭과 길이를 구하였다. ILO를 설계하는데 있어서 사용된 능동소자는 Avantek사에서 개발된 ATF 13736 소자로서 2-16GHz에서 동작되는 저잡음을 갖는 FET이다.

그림 4는 본 논문에서 설계 구현한 ILO의 구조이다. 그림에서와 같이 injection 입력단자에 -10dB directional coupler를 사용하여 능동소자의 게이트 스텐브와 결합하였으며 발진기부는 발진기의 발진조건에 따라 먼저 게이트단과 소오스단에 연결된 스텐브의 길이 l_1 과 l_2 를 구하였다. 스텐브는 개방 스텐브(open stub)로 설계하였으며 이때 공진기와 능동소자사이의 단자에서 능동소자를 바라다본 S_{11} 의 위상부분이 "0"을 교차할때 부성저항 특성, 즉 드레인단에서 능동소자를 바라본 반

사계수가 가장 크도록 게이트단의 스텐브 길이와 소오스단의 스텐브 길이를 조절하여 설계하였다.

그림 5는 ILO의 발진 가능성을 위한 시뮬레이션 결과이다. 그림에서와 같이 공진기와 능동소자사이의 단자

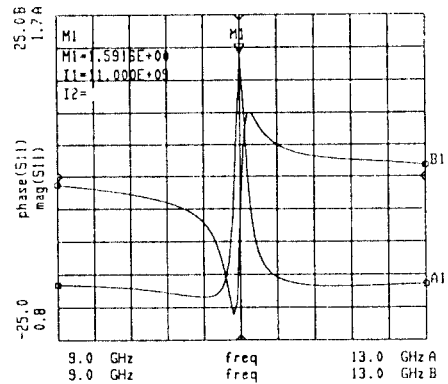


그림 5. ILO의 발진 가능성
Fig. 5. Oscillation possibility of the ILO

에서 능동소자를 바라다본 S_{11} 의 위상이 "0"을 교차하고 크기가 1이상을 만족하는 부분은 약 11GHz로 이때 발진 가능성이 가장 높다.

제 3 절. 집적화된 AMPA의 설계 및 제작

Pozar의 MSANT program으로 초기 설계한 MPA와 Kurokawa에 의한 부성저항 FET ILO의 이론에 의해 설계한 진송형 ILO를 동일 평면상에 집적화한 AMPA 회로는 HP사의 MDS를 이용하여 설계하였다. 설계시에 원하는 주파수에서 AMPA로 부터 최대 방사전력을 얻기 위해서는 MPA의 공진주파수와 ILO의 발진주파수가 일치해야 된다. 이를 위해 ILO의 주파수를 위한 게이트단과 발진을 하기 위한 소오스단의 게방 스텐브 길이와 폭을 조절하였으며 MPA의 입력단과 ILO의 출력단을 연결하기 위해서 드레인단의 스텐브의 길이를 조절하여 설계하였다. 이와같이 설계된 AMPA에 RF쇼크 역할을 하는 low-pass 필터 구조로 바이어스 회로를 구성하여 최종적인 회로를 구현한뒤 MDS상에서 layout 하였다. 그림 6은 일반적인 photo 옛칭 기법으로 MPA와 ILO를 동일 평면상에 집적화하여 실제 제작한 injection-locking AMPA의 구조를 나타

낸 것이다.

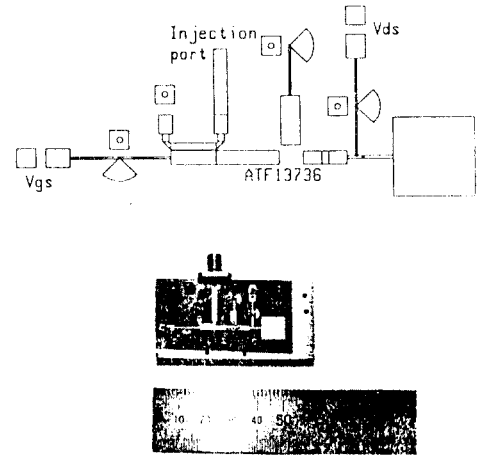
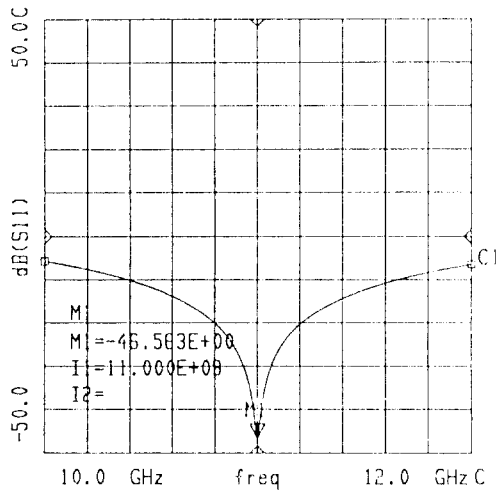
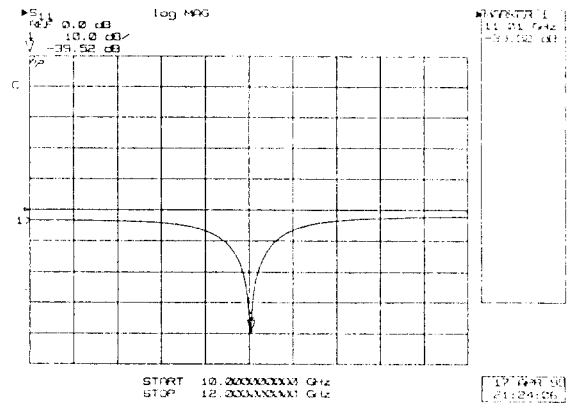


그림 6. 설계 제작된 AMPA
Fig. 6. Designed and fabricated for the AMPA



(a) simulation 결과치



(b) 측정 결과치

그림 7. MPA의 반사손실 특성
Fig. 7. A characteristics of return loss of the MPA

V. 실험결과 및 고찰

본 논문에서 설계 제작된 MPA에 대해 측정된 반사 손실 특성을 그림 7에 나타내었다. 설계 주파수인 11GHz와 거의 일치되는 11.01GHz에서 반사손실이 약 -39.52 dB값을 가졌고 이때 최대의 방사전력을 얻게된다. 그림 8은 드레인 전압에 대한 AMPA의 출력 스펙트럼을 나타낸 것이다. 게이트 전압 $V_{gs} = -0.4V$ 로 인가하고 드레인 전압 $V_{ds} = 0V$ 에서부터 서서히 증가하여 $V_{ds} = 1.3V$ 되었을때 출력 스펙트럼 $P_{out} = -11.5dBm$ 에서 발진이 개시되어 5.6V를 인가시 최대치인 $P_{out} = -0.67dBm$ 을 나타내었다. 그림 9는 AMPA의 방사출력 스펙트럼을 측정한 것으로 측정을 위해 동축케이블의 한쪽 끝은 spectrum analyzer에 연결하고 다른 한쪽 끝은 SMA conector 대신에 probe를 연결한 뒤 패치 중심 위 1Cm 거리에 위치시켜 출력신호를 검출하였다. 그림9-(a)는 우선 AMPA에 injection 신호를 인가하지 않고 injection port를 50Ω으로 종단한 후 free-running한 상태에서 측정된 출력 스펙트럼으로 span을 20GHz로 하고 발진기부의 MESFET의 게이트단에 -0.4V, 드레인단에 5.3V의 바이어스 전압을 인가시켰을때 설계 주파수 11GHz에서 20MHz 천이된 주파수인 10.98GHz에서 -2.00dBm의 출력 레벨을 얻었으며 그림9-(b)는 free-running한 상태에서 측정된 출력 스펙트럼으로 span을 1MHz로 하고 발진기부의 게이트

단에 -0.4V, 드레인단에 6.39V 인가했을때 11.12GHz에서 약 0.5dBm의 출력 레벨을 얻었으며 그림9-(c)는 AMPA의 외부에서 injection port에 RF신호원을 Network analyzer 8510c로 injection 하였을때 span을 1MHz로 하고 발진기부의 게이트단에 -0.4V, 드레인단에 6.39V 인가했을때 약 11.12GHz에서 약 0.33dBm의 출력 레벨을 얻었다.

그림9-(b)와 (c)를 비교해 볼때 외부 RF신호원을 injection-locking 하였을때 AMPA의 출력이 더욱

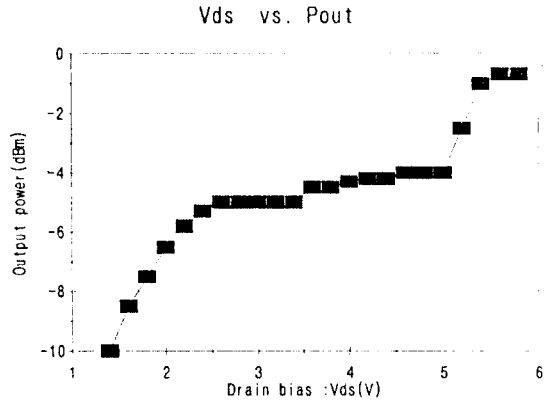
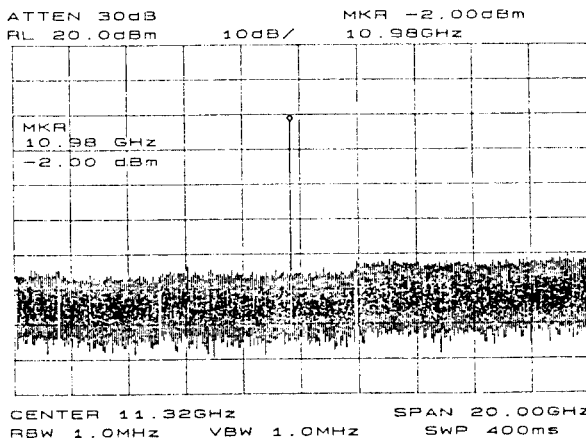
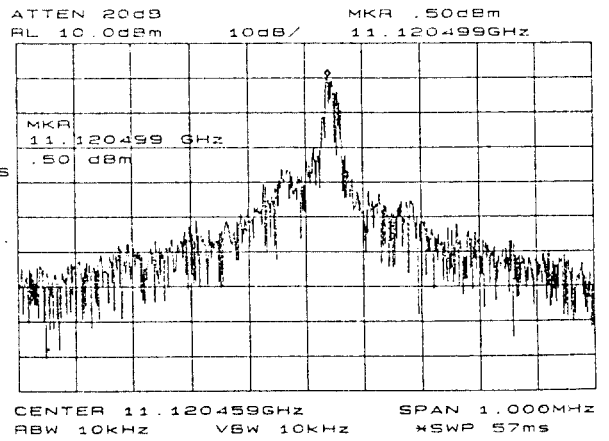


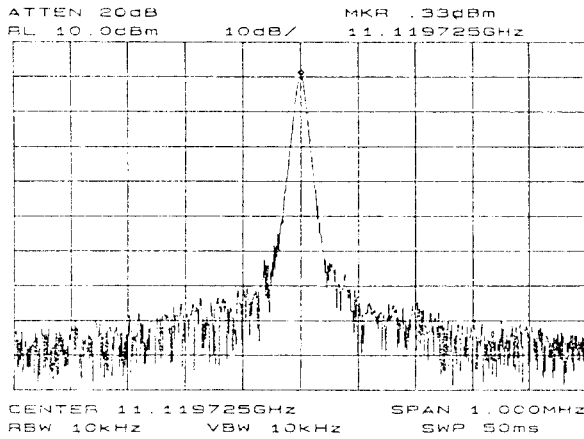
그림 8. 드레인 바이어스 전압에 대한 AMPA의 출력 스펙트럼
Fig. 8. Output spectrum of the AMPA vs. drain bias



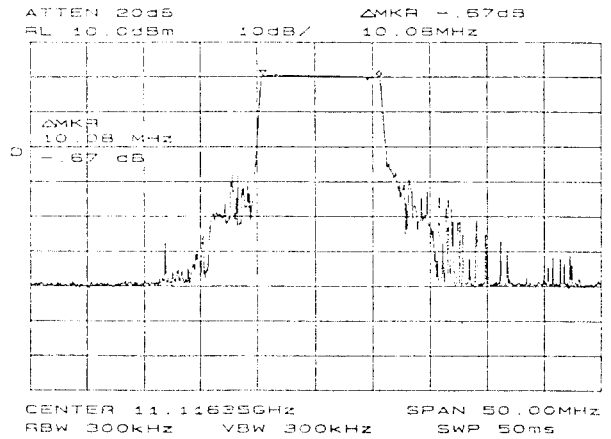
(a) free-running 모드일때의 출력 스펙트럼 (span 20GHz)



(b) free-running 모드일때의 출력스펙트럼 (span 1MHz)

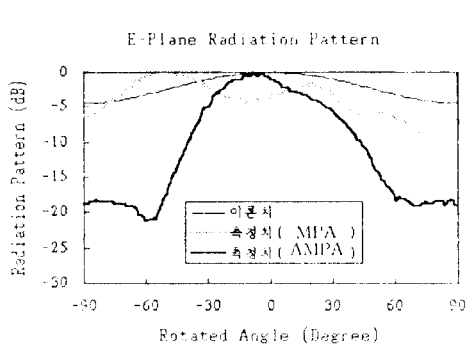


(c) injection-locking 모드일때의 출력 스펙트럼(span 1MHz)

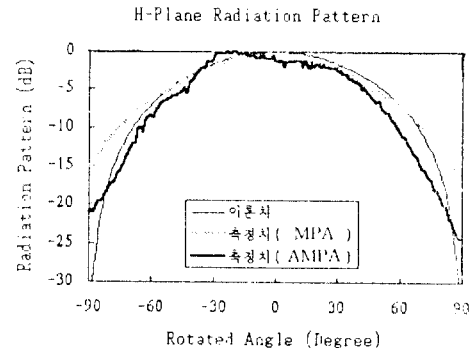


(d) AMPA의 locking range(10MHz의 대역폭)

그림 9. AMPA의 방사 출력 스펙트럼
Fig. 9. Radiated output spectrum of the AMPA



(a) E-plane 방사패턴



(b) H-plane 방사패턴

그림 10. 측정된 AMPA의 방사패턴
Fig. 10. Measurement radiation-pattern of the AMPA

더 안정됨을 알 수 있었다. 그림9-(d)는 외부에서 RF 신호원을 injection-locking했을때 출력 스펙트럼의 locking range를 나타낸 것으로 중심 주파수 11.11635GHz를 중심으로 10.08MHz의 대역폭을 갖는다.

그림 10은 제작된 MPA와 AMPA의 E-plane 방사 패턴과 H-plane 방사패턴을 이론치와 비교한 결과에 대해 나타낸 것이다. 최대 출력 스펙트럼을 갖는 바이어

스전압과 중심 주파수에 대해서 측정된 방사패턴으로서 그림 10-(a)는 E-plane에 대한 방사패턴으로서 이론치에 비해 -90°와 90°부근에서 MPA인 경우에는 약 5dB, AMPA인 경우에는 약 15dB의 차이를 보이고 있는데 이것은 이론값의 경우 급전선의 기생복사와 유전체 영향을 고려하지 않았을 뿐만아니라 기판 에칭과정에서 발생하는 길이 오차와 측정시 SMA connector와 스트립 선로간의 정합상태 불일치 등에 의해서 차이를

나타낸 것으로 보며 특히 AMPA인 경우에는 집적화된 능동회로 부분에서의 기생방사와 방사소자와의 간섭에 의하여 차이를 나타낸 것이다. 그림10-(b)는 H-plane 에 대한 방사패턴으로 rotated angle이 azimuthal - angle이기 때문에 E-plane에 비해 집적화된 능동회로 부분에 의한 영향이 적을 뿐만 아니라 패치의 양쪽 엣지 부분에서 에칭시의 오차에 의해 약간의 차이가 있었으나 이론값과 MPA, AMPA가 거의 일치함을 알 수 있었다. 이와 같은 방사패턴상의 차이는 다층 마이크로스트립 구조로 하여 패치 안테나 부분과 급전선로부 및 능동 소자 부분을 분리하여 설계 제작한다면 서로간의 간섭이 적기 때문에 개선될 뿐만 아니라 MPA의 단점인 저효율, 협대역 특성을 보완할 수 있을 것이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 HP사의 M/W 상용 CAD인 MDS software로 최적화된 회로를 설계한 후 단일 평면상에서 집적화된 AMPA를 제작하였다. 외부 RF신호원을 injection-locking한 AMPA의 방사출력 스펙트럼은 free-running한 경우에 비해 안정화 됨을 확인하였고 AMPA와 MPA의 E-plane 방사패턴인 경우에는 능동 소자와 방사부의 간섭에 의해 이론적으로 예측된값과 차이를 보인 반면 H-plane 방사패턴은 거의 일치하였다.

본 논문에서 설계 제작된 AMPA의 실험 결과 패치가 복사소자로서 안테나로도 동작할뿐만 아니라 능동소자의 발진주파수를 안정화하기 위한 공진기로 동작함을 알 수 있었고 이와같은 결과는 배열화된 AMPA의 ILO 위상을 전자적으로 각각 조절할 수 있기 때문에 페라이트 및 pin-diode등과 같은 위상 천이기에 대신하여 beam forming과 beam scanning이 가능한 이동 및 위성통신용 Active Phased array antenna 및 팔리움직이는 목표물 추적을 위한 레이더용 위상 배열 안테나로도 이용될 수 있다.

참고문헌

1. Naohisa Goto, "The Impact of mobile radio communications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 34, No. 2, pp.27-29, April, 1992.
2. Robert J. Mailloux, "Array elements and Architecture of printed Circuit Array Antennas," *IEEE MTT_S Newsletter*, pp.29-32, Summer 1988.
3. 이두한, 홍의석, "능동 마이크로스트립 패치 안테나의 설계 및 제작," 마이크로파 및 전파전파 학술발표회 논문집, Vol. 18, No. 1, pp.145-148, May, 1995.
4. J. Lin and T. Itoh, "Active Integrated Antennas," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-42, pp.2186-2194, Dec., 1994.
5. J. Lin, S. Chew and T. Itoh "A unilateral injection-locking type active phased array for beam scanning," *IEEE MTT-S Int. Microwave symp. Dig.*, Vol. 2, San Diego, CA, pp.1231-1234, May 23-27, 1994.
6. U. Karacaglu, N. S. Aujla, I. D. Robertson and J. Watkins, "An active patch antenna topology based on negative resistance FET Oscillator design," *23rd European Microwave Conf. Procs.*, Vol. 1, pp.920-922, Sept., 1993.
7. K. R. Carver and J. W. Mink, "Microstrip Antenna Technology," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, Vol. AP-29, pp.2-24, January 1981.
8. David M. Pozar, "Antenna Design Using Personal Computers," *Artech House*, pp.121-141, 1985.
9. Eric Holzman, "Solid-State Microwave Power Oscillator Design," *Artech House*, pp.175-216, 1990.



李斗漢(Du Han Lee) 정회원

1963년 6월 5일생
 1988년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)
 1990년 2월 : 광운대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사)
 1994년 2월 : 광운대학교 대학원 전자통신공학과 박사과정 수료
 ※주관심 분야 : MIC 및 MMIC회로 설계, Antenna & Propagation 이동 및 위성통신

洪義鏞(Ui Seok Hong) 정회원

1968년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)
 1973년 9월 : 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
 1982년 11월 : 독일 Aachen 공대 전자공학과 졸업(공학박사)
 1976년 10월~1982년 12월 : 독일 Aachen 공대 초고주파 연구소 연구원
 1986년 2월~1987년 2월 : 미국 University of Texas(Austin) 객원교수
 1974년 3월~1992년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
 1992년 3월~현재 : 광운대학교 전파공학과 교수/공과대학장
 1989년 1월~1991년 12월 : 대한전자공학회 편집위원
 1988년 1월~현재 : 한국통신학회 사업이사
 1991년 1월~현재 : 한국전자파기술학회 평의원
 1991년 3월~현재 : 위성통신 및 우주산업 연구회 이사
 1993년 3월~현재 : 국제 기능 올림픽 한국위원회 통신기기 심사장
 ※주관심 분야 : MIC 및 MMIC회로 설계, Antenna & Propagation 이동 및 위성통신