

능동 위상배열 안테나를 위한 Injection-Locking Coupled Oscillators

正會員 김 교 헌*, 이 두 한*, 류 연 국**, 이 승 무***, 오 일 덕****, 홍 의 석*

The Injection-Locking Coupled Oscillators for the Active Integrated Phased Array Antenna

Kye Hun Kim*, Du Han Lee*, Yeon Guk Ryu**, Seung Moo Lee***,
Eel Deok Oh****, Ui Seok Hong* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 Active Integrated Phased Array Antenna(AIPAA) 시스템에서 위상변위기 역할을 하는 Injection-Locking Coupled Oscillators(ILCO)를 설계, 제작하였다. Injection-Locking Hair-pin Resonator Oscillator(ILHRO)와 단방향성 증폭기로 선형배열된 2단 ILCO에서 배열 인자인 첫 번째단과 두 번째단 ILCO는 각각 동일한 주파수 가변범위와 11.5MHz, 14MHz의 locking 대역폭을 얻었다. 첫 번째단 ILCO를 기준 locking 모드($\Delta\phi=0^\circ$)로 했을 때 두 번째단 ILCO에서 위상변위량 $\Delta\phi=158.4^\circ(-78.0^\circ\sim 80.4^\circ)$ 를 얻었다. 따라서 ILCO를 AIPAA에 적용할시 빔 스캐닝 각은 33.4° 로 예측할 수 있다. 또한 각 단의 ILCO는 상호 locking 모드에서 우수한 주파수 안정도와 AM, FM 및 PM 잡음 특성을 얻었다. 이와 같은 ILCO는 AIPAA에서 위상변위기 역할을 할 뿐만 아니라 mm-wave 대역의 전력결합 소자로 이용될 수 있으며 송, 수신 MMIC 모듈화에 활용될 수 있다.

ABSTRACT

This paper deals with the design and development of an Injection-Locking Coupled Oscillators(ILCO), which

*광운대학교 전자공학과/(신기술 연구소 연구원)
Department of Radio Science & Engineering/(Institute of New Technology)

**충주산업대학교 전자공학과
Department of Electronic Engineering, Chung-Ju National University

***충남전문대학 전자과
Department of Electronic Engineering, Chung-Nam Junior College

****대전산업대학교 전자공학과
Department of Electronic Engineering, Daejeon National University of Technology

論文番號:96180-0614
接受日字:1996年 6月 14日

functions like phase-shifter in the Active Intergrated Phased Array Antenna(AIPAA). This linear array 2-element ILCO consists of two Injection Locking Hair-pin Resonator Oscillators(ILHRO) and an unilateral amplifier. The first and second elements of the ILCO have same frequency tuning range but locking bandwidths of 11.5MHz and 14MHz respectively. A phase shift of $\Delta\phi = 158.4^\circ (-78.0^\circ \text{ to } 80.4^\circ)$ could be obtained in the second element of ILCO when the first element of the ILCO was in the reference locking mode($\Delta\phi = 0^\circ$). When the ILCO is applied to the AIPAA, the predicted beam scanning angle value will be 38.4° .

Each ILCO gives good frequency stability and lower AM, FM, and PM noise characteristics in the mutual coupling locking mode. The ILCO can not only play a part as the phase shifter for the AIPAA but it can also be used as the power combining device in the mm-wave frequency range and as a part of a T/R MMIC module.

I. 서 론

최근 평면구조의 마이크로스트립 배열 안테나와 위상변위기용 능동회로부를 동일 기판상에 집적화 하여 소형, 경량의 고효율, 고이득 특성을 가지며 빔 제어 기능을 갖는 Active Integrated Phased Array Antenna(AIPAA)가 활발히 연구되고 있다[1]-[4]. 기존의 위상배열안테나는 switched delay-line, PIN-diode 등과 같은 수동, 능동 소자를 위상변위기로 빔을 제어하는 방법이 있었으나 고 집적화에 따른 공간상의 제약, signal drop-out으로 인한 연속적인 제어 능력 및 신호 감쇠 등의 문제점을 갖는다[5]. 본 논문에서는 이와 같은 단점을 보완하기 위한 일련의 연구로 빠르고 지속적인 위상변위기 역할 뿐만 아니라 송, 수신 모듈화에 용이한 Injection-Locking Coupled Oscillator(ILCO)를 설계, 제작하였다. 설계, 제작된 ILCO는 Injection-Locking Hair-pin Resonator Oscillator(ILHRO)와 단방향성 증폭기로 구성된다. 이때 ILHRO에서 병렬결합 소자로 이용된 2차원 평면 구조의 마이크로스트립 선로 hair-pin 공진기는 3차원 구조의 dielectric resonator oscillator (DRO) 보다 넓은 주파수 가변범위와 locking 대역폭을 갖는다[6]-[10]. 또한 ILCO의 상호결합 소자로 이용된 단방향성 증폭기는 선형배열시 역방향 locking 신호를 제거할 수 있으며 locking 대역폭을 제어할 수 있다[4]. 이와 같은 ILCO를 AIPAA에 적용한다면 선형적인 위상변위와 효율적인 빔 스캐닝 각을 기대할 수 있다. 따라서 본 논문의 ILCO는 AIPAA와 phased-array radar 시스템의 위상변위기로 이용될 뿐만 아니라 mm-wave 대역의 전력결합회로와 송, 수신 모듈의 고 집적화에 따른 MIC 및 MMIC에 적합한 구조라 할 수 있다.

II. Injection-Locking Coupled Oscillators

Van der Pol에 의해서 정립된 Injection-locking 이론은 Kurokawa가 부성저항 Injection-Locking Oscillator(ILO)에 대한 실험을 통하여 타당성을 입증하였다. ILO는 일반적인 VCO로 동작하는 free-running 발진기 입, 출력부에 RF 소신호를 인가하는 기법이다. 이와 같은 ILO 특성은 그림 1의 device 임피던스 궤적과 circuit 임피던스 궤적의 상호 변화에 의해서 설명될 수 있다[5].

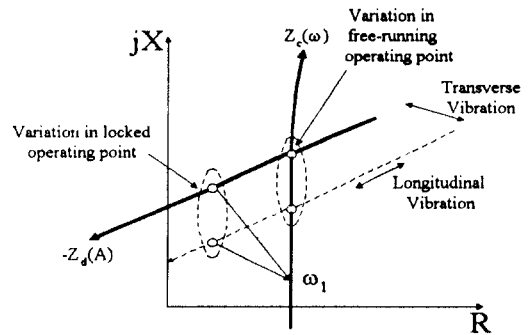


그림 1. ILO의 잡음 특성
Fig. 1. Noise characteristics of the ILO

여기서, $-Z_d(A)$ 는 device 임피던스, $Z_c(\omega)$ 는 circuit 임피던스를 나타낸다. 그림 1에서 free-running 발진기가 injection locking될 때 발진 신호는 circuit 궤적상의 ω_1 에 고정되어 longitudinal 진동과 transverse 진동에 의해서 발생하는 AM, FM 및 PM 잡음 특성은 개선된다. 그러나 device 임피던스 궤적의 transverse 진동에 의한 FM 잡음 특성은 완전히 제거되지 않

며 이는 일정한 locking 범위내에서 위상의 변화를 발생시키는 원인이 된다. 이와 같은 ILO는 injection 방법에 따라서 반사형 ILO와 전송형 ILO로 구분된다. 특히 전송형 ILO는 반사형 ILO에 비하여 3-terminal 소자에 적합한 형태로써 locking 신호와 RF 출력단을 분리시켜 넓은 주파수 가변범위와 locking 대역폭을 얻을 수 있다.

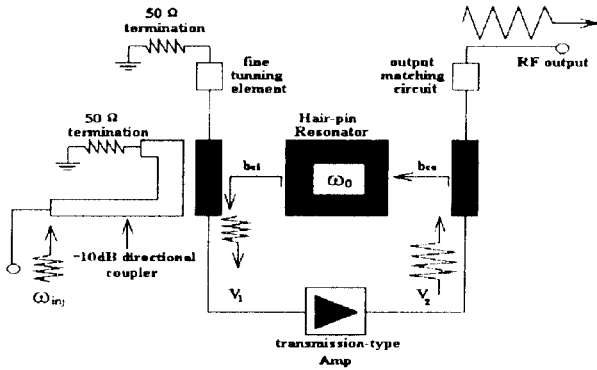


그림 2. ILHRO의 블록도
Fig. 2. A block diagram of the ILHRO.

그림 2는 병렬케환 전송형 ILHRO의 블록도를 나타내고 있다. ILHRO는 출력 레벨을 결정하는 비선형 소자, free-running 발진기의 발진 주파수와 주파수 가변범위, locking 대역폭에 따른 위상변위량을 결정하는 hair-pin 공진기, 그리고 injection 단자인 -10dB 방향성 결합기로 구성된다[10].

위의 ILHRO에 대한 블록도에서 인가되는 RF 소신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

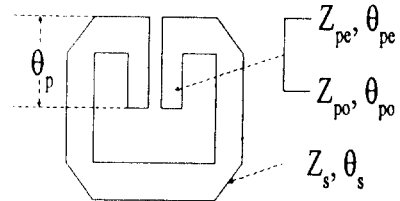
$$V_{inj} = A_{inj} e^{j\phi_{inj}} \quad (1)$$

윗 식에 의해서 동기된 입력전압 V_1 은 케환 전압과의 합으로써 다음과 같다.

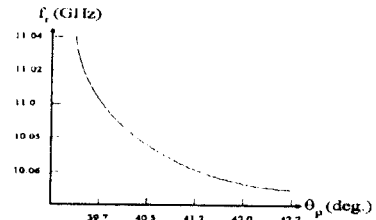
$$V_1 = v_2 b_c H + V_{inj} \quad (2)$$

여기서, b_c 는 전체 전압 케환결합계수($b_{ci} \cdot b_{cd}$), H 는 hair-pin 공진기의 전압 전달함수으로써 $H = H_r + jH_i$ 를

나타내는데 그림 3에 2차원 평면구조의 hair-pin 공진기에 대한 회로도(a)와 병렬결합선로의 길이에 따른 주파수 특성 그래프(b)를 나타내고 있다.



(a) 회로도



(b) 병렬 결합선로의 주파수 특성

그림 3. Hair-pin 공진기의 특성
Fig. 3. A characteristics of the hair-pin resonator.

그림 3(a)에서 나타난 각각의 파라미터는 hair-pin 공진기의 주파수 특성을 결정하며 external-Q(Q_{ext}) 값은 대역통과 주파수 응답 특성에서 기준 공진 각주파수 (ω_0)와 -3dB down point에서의 각주파수(ω_1)의 전달함수로 구할 수 있다[7], [10]. 이때 기준 공진주파수는 기수모드에서 일어나며 Q_{ext} 값은 ILHRO가 locking 모드로 동작시 locking 대역폭을 결정할 뿐만 아니라 잡음 특성을 결정한다.

이와같은 hair-pin 공진기를 병렬케환 요소로 이용한 ILHRO가 식 (1)의 injection 신호에 의해서 locking 될 때 free-running 신호(ω_0)와 injection 신호(ω_{inj}) 사이에는 다음과 같은 위상변위 식이 성립된다[6], [8].

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q_{ext}} \frac{A_{inj}}{A} \sin(\phi_{inj} - \phi) \quad (3)$$

$$\Delta\phi = \sin^{-1} \left(\frac{\omega_{inj} - \omega_0}{\Delta\omega_m} \right) \quad (4)$$

식 (3)의 Q_{ext} 는 ILHRO의 외부 양호도로써 정상상태로 동작시 $d\phi/dt = \omega_{inj}$ 이 되며 $\phi_{inj} - \phi = \Delta\phi$ 라 할 때 식 (4)와 같은 간략화된 식으로 위상변위량($\Delta\phi$)을 나타낼 수 있다. 여기서, ω_0 는 공진 주파수, $\Delta\omega_m = \frac{\omega_0}{2Q_{ext} \cdot b_c}$ $\sqrt{\frac{A_{inj}}{A}}$ 는 locking 대역폭으로써 $\Delta\phi$ 를 결정하는 중요한 파라미터이며 또한 $\Delta\omega_m$ 은 b_c 와 Q_{ext} 에 반비례하므로 넓은 locking 대역폭을 얻기 위해서는 유전율이 높은 유전체 공진기(DR)보다 b_c , Q_{ext} 값이 작은 마이크로스트립 공진기를 이용한 전송형 ILHRO가 적합하다[6], [8], [10]. 이상과 같은 ILHRO를 N개의 선형배열(ILCO)로 구현할때 각각의 ILCO 사이에는 식 (4)와 같은 일정한 위상변위량을 연속적으로 발생하므로 위상변위기 역할을 한다[3], [4], [6].

그림 4는 ILCO를 이용한 AIPAA 시스템에 대한 기본적인 블럭도를 보여주고 있다. ILCO는 ILHRO, injection locking 단자, 단방향성 증폭기로 구성된다. ω_{inj} 으로 locking되어 위상 ϕ_1 을 갖는 첫 번째단 ILCO는 단방향성 증폭기를 통하여 두 번째단 ILCO를 locking 시켜 위상 ϕ_2 를 발생시킨다. 이때 단방향성 증폭기는 두 번째단 ILCO의 주파수 동기 뿐만 아니라 locking 대역폭을 제어하며 역방향으로 injection 되는 신호를 억제시킨다. 따라서 첫 번째단과 두 번째단 ILCO 사이에는 일정한 위상차 $\phi_2 - \phi_1$ 이 일어나며 N개의 선형배열된 ILCO 사이에는 2단 ILCO와 같은 원리에 의해서 $\Delta\phi = \phi_n - \phi_{n-1}$ 가 유도된다. 이는 ILCO를 이용한 AIPAA의 구현이 가능함을 보여준다. 이상과 같은 ILCO의 원리에 의해 AIPAA는 다음과 같은 빔 스캐닝 각을 갖는다[3], [4].

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\lambda_0 \Delta\phi}{2\pi d_x} \quad (5)$$

여기서, λ_0 는 자유공간 파장이며 d_x 는 ILCO 사이의 결합간격으로써 AIPAA의 빔 스캐닝 각을 결정할 뿐만아니라 주파수 안정도(frequency stability)를 결정한다. 또한 $\Delta\phi$ 는 식 (4)에서 유도된 식으로써 $-90^\circ < \Delta\phi < +90^\circ$ 의 범위에서 빔 스캐닝이 일어난다[3], [4].

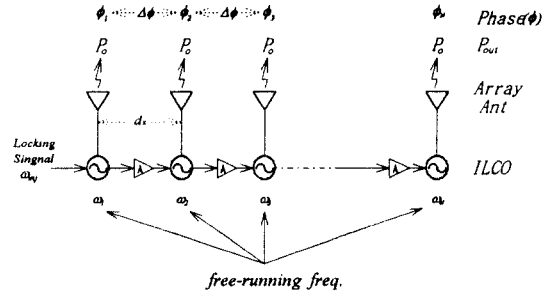


그림 4. ILCO를 이용한 AIPAA의 블럭도
Fig. 4. Block diagram of an AIPAA using the ILCO.

III. 설계 및 제작

본 논문의 ILCO는 상용 마이크로웨이브 CAD인 HP사의 MDS b.06을 이용하여 시뮬레이션 하였다. ILCO를 구성하는 주 서브회로인 ILHRO를 최적 설계한 후 단방향성 증폭기를 ILCO간의 상호결합 소자로 밀 결합 관계를 이용하여 최종적으로 2단 ILCO를 설계하였다. ILCO의 배열 소자인 ILHRO와 단방향성 증폭기의 비선형 능동소자는 제작상의 단순화를 위해서 저잡음 지수와 위상 섭동을 최소화 할 수 있는 GaAs MESFET인 ATF13036 소자를 이용하였다. Curtice Cubic Modelling 방법으로 비선형 모델화된 ATF13036 소자로써 ILHRO의 1단 증폭기를 설계한 후 발진을 유도하며 발진주파수를 결정하는 hair-pin 공진기를 게이트와 드레인단의 역위상(antiphased) 결합 관계를 이용하여 병렬케환 회로부를 설계한 후 발진조건을 만족하도록 공진부의 결합 길이와 능동케환 루프의 길이를 최적화하여 위상이 "0", 케환 이득이 "1"보다 큰 값을 갖도록 ILCO의 배열소자인 ILHRO를 최종적으로 설계하였다.

그림 5는 ILHRO에서 병렬케환 소자로 이용된 hair-pin 공진기 필터의 주파수 응답 특성 그래프이다. 중심주파수인 11GHz에서 삽입손실이 -0.7dB, 반사손실이 -24dB, 중심 주파수로부터 -3dB 점에서의 차단주파수는 11GHz±130MHz인 대역 통과 특성을 보이고 있다. 이와 같은 파라미터를 기초로 hair-pin 공진기가 갖는 각각의 전기적 파라미터 값은 다음과 같다.

$$Z_s = 50\Omega, \theta_s = 104^\circ, Z_{pe} = 89.2\Omega, Z_{po} = 28\Omega, Q_{ext} = 148$$

그림 6은 ILHRO의 선형해석을 통해서 본 발진 가능성을 나타낸 것이다. 설계된 1단 전송형 증폭기의 게이트와 드레인단을 hair-pin 공진기를 이용하여 병렬회환 회로부를 구현한 후 발진기 선형해석에 이용되는 발진기 테스트 포트들 게이트의 입력단에 부가하여 시뮬레이션 하였다. 이때 hair-pin 공진기의 기수모드에서 일어나는 기준 주파수(11GHz)에서 위상이 "0"를 교차하며 이득이 "1"보다 큰 값을 가지므로써 초기 발진 조건을 만족하였다.

그림 7은 발진 조건을 만족한 발진기의 출력 특성을 미리 예측하므로써 시뮬레이션에서 얻은 결과와 실제 제작 후 실험상의 오차를 최대한 줄이기 위하여 비선형 해석 방법인 harmonic balance로 주파수 영역에서 해석한 결과를 나타내고 있다. 기준 주파수인 11GHz에서 약 17dBm의 높은 출력 레벨과 2차 고조파간의 차가 -45dBc로 우수한 고조파 억제량을 보이고 있다. 즉, 출력신호가 안정된 잡음 특성을 나타내는데 이는 외부에서 인가되는 injection 신호를 -10dB 방향성 결합기를 이용하여 구현할 때 게이트단을 50으로 중단시킴으로써 단락회로가 되어 반사되는 신호가 제거되므로 스퓨리어스 성분 같은 잡음을 최대한 억제할 수 있기 때문이다.

그림 8은 ILCO 사이의 주파수 동기화 두 번째단 ILCO의 locking 대역폭을 제어할 수 있는 단방향성 증폭기의 시뮬레이션 특성 그래프이다. ILCO를 위상변위기로 이용하는 AIPAA에서 빔 스캐닝 각과 주파수 안정도를 고려하여 첫 번째단과 두 번째단 ILCO 사이의 결합 간격(d_z)을 $0.75 \lambda_0$ 가 되도록 단방향성 증폭기의 크기를 최적 설계하였다. 또한 단방향성 증폭기에서 발생하는 위상변위 값이 0° 가 되도록 비선형 해석을 통하여 최적 설계하였다.

그림 9는 이상과 같은 조건하에서 최적 설계된 2단 ILCO의 layout 형태이다. 그림에서와 같이 hair-pin 공진기와 단방향성 증폭기를 이용하므로써 집적화에 용이하며 제작상의 단순화를 기대할 수 있다. 즉, ILCO를 2단 이상의 다중 배열시 매우 적합하다. 이와 같이 layout된 ILCO는 Chukoh사의 Teflon 기판인 $\epsilon_r = 2.6, h = 0.54\text{mm}$ 로써 제작하였다.

Qualifier=
Dataset=pr

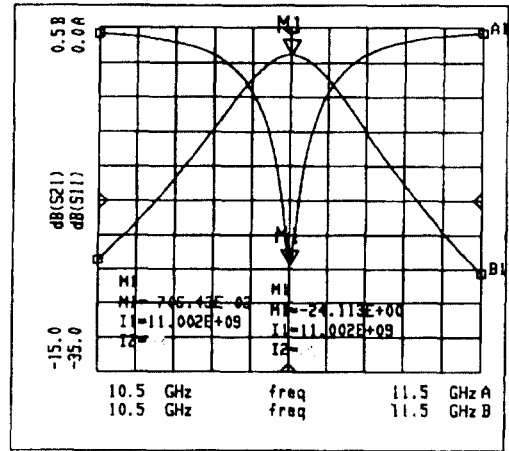


그림 5. Hair-pin 공진기 필터의 대역 통과 특성
Fig. 5. A bandpass characteristic of the hair-pin resonator filter.

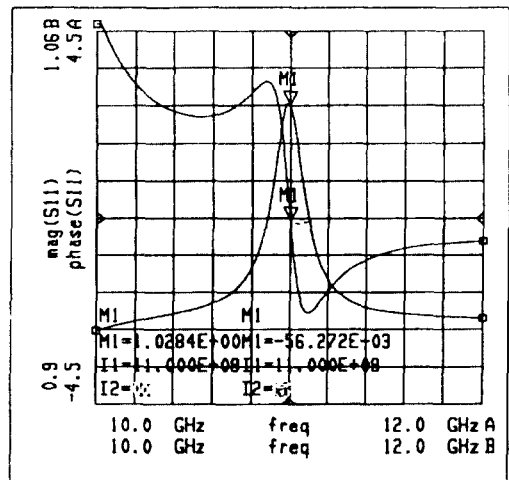


그림 6. ILHRO의 발진가능성
Fig. 6. Oscillation possibility of the ILHRO.

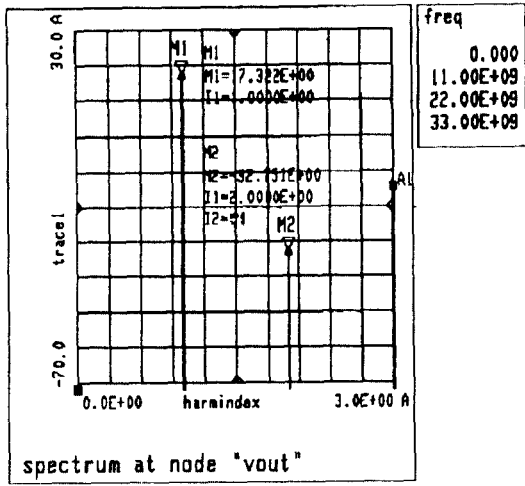


그림 7. ILHRO의 비선형 특성
Fig. 7. A nonlinear characteristic of the ILHRO.

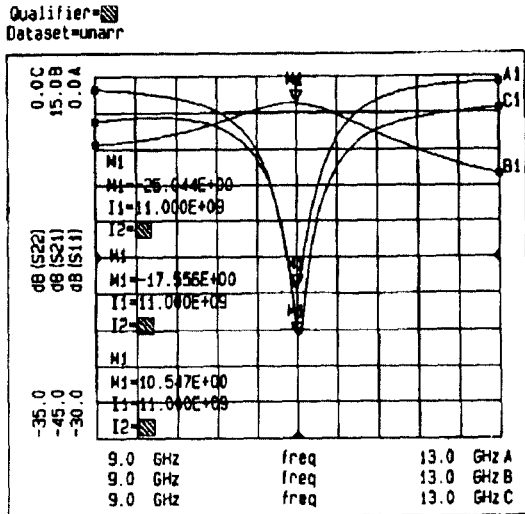


그림 8. 증폭기의 시뮬레이션 결과 특성
Fig. 8. Simulation results characteristic of the amplifier.

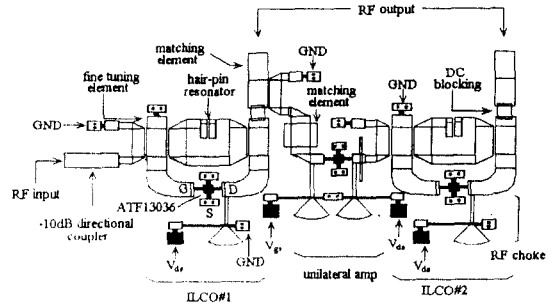


그림 9. 2단 ILCO의 회로
Fig. 9. Layout diagram of the two-stages ILCO

IV. 측정결과 및 분석

설계, 제작된 ILCO는 HP-8510C 회로망 분석기를 injection 신호원으로 출력 특성은 HP-8563E 스펙트럼 분석기로 측정하였다. ILCO의 초기 측정 단계로써 ILHRO와 단방향성 증폭기에 대한 출력 특성을 측정한 후 최종적으로 2단 ILCO의 각 출력 단자에 대한 특성을 측정 분석하였다. ILHRO의 injection 단자를 50Ω 으로 종단시킨 후 free-running 모드에서 $V_{ds} = 2.1V$ 인가시 초기 발진 가능성을 보였으며 4.3V에서 정상 상태로 동작한 후 5.5V에서 포화 현상을 보였다.

그림 10은 span 500KHz에서 ILHRO가 free-running 모드로 동작시 측정된 출력 특성을 보여주고 있다. ILHRO의 injection 단자를 50Ω 으로 종단시킨 후 $V_{ds} = 4.3V$ 를 인가했을때 설계 주파수인 11GHz에서 11.17 dBm의 출력 레벨을 얻었다. 또한 $V_{ds} = 5.5V$ 로 인가시 출력 레벨이 오히려 감소하는 포화 현상을 보였다.

그림 11은 locking 모드로 동작하는 첫 번째, 두 번째단의 ILCO에 대한 span 10kHz에서 측정된 출력 스펙트럼이다. (a)는 그림 10과 같은 free-running 모드에 -10dB 방향성 결합기를 이용하여 11.0GHz, -14dBm의 locking 신호를 인가할때 첫번째단 ILCO는 locking 신호에 동기 되어 short term stability와 AM, FM 및 PM 등의 잡음 특성이 월등히 개선되었으며 출력 레벨도 12.83dBm으로 free-running 모드보다 약 12% 증가된 결과를 얻었다. 이때 두 번째단 ILCO는 50Ω 종단한 후 측정하였다. (b)는 (a)에서 출

력되는 신호를 7dB 이득을 갖는 단방향성 증폭기에 의해서 locking된 두 번째단 ILCO의 출력 특성으로써 (a)에 상응하는 주파수 안정도와 잡음 특성을 나타내고 있다. 즉, 단방향성 증폭기에 의해서 locking된 두 번째단 ILCO는 첫 번째단 ILCO와 동일 주파수 안정도와 잡음 특성으로 보아 2단 ILCO가 정상적으로 동작함을 알 수 있다. 이때 출력 레벨의 차는 첫 번째단 ILCO의 출력부에 결합된 -10dB 방향성 결합기로 인한 감쇠 현상으로 볼 수 있다.

그림 12는 그림 11의 (a), (b)에 대한 locking 대역폭을 측정된 것으로서 11.5MHz, 14MHz의 결과를 얻었다. (a)의 11.5MHz는 두 번째단 ILCO의 출력 단자를 50Ω으로 종단한 후 $V_{ds}=4.3V$ 인 상태에서 locking 신호를 $11 \pm 0.00575GHz$ 로 가변했을 때 얻은 locking 대역폭이다. 반면 (b)는 (a)의 11.5MHz 보다 약 20% 향상된 14MHz의 locking 대역폭을 보여주고 있다. 즉, locking 대역폭을 결정하는 locking 신호의 레벨을 단방향성 증폭기를 이용하여 제어 하므로써 증가함을 알 수 있다. 또한 hair-pin 공진기를 이용하므로써 Q_{ext} , b_c 값에 의해서 결정되는 각각의 ILCO에 대한 locking 대역폭을 넓힐 수 있음을 알 수 있었다.

그림 13은 두 번째단 ILCO가 unlocking 모드로 될 때의 출력 스펙트럼이다. 첫 번째단 ILCO의 안정된 locking 모드를 기준으로 두 번째단 ILCO의 14MHz locking 대역폭내에서 V_{ds} 값의 locking 전압(4V~5.2V)을 벗어났을 때 발생하는 unlocking 모드이다. 즉, locking 모드와 비교시 출력 레벨이 감소하며 주파수 안정도와 잡음 특성이 free-running 모드와 유사한 결과를 보였다. 따라서 미소 주파수 변화에 의한 위상 변위기 역할을 정상적으로 할 수 없음을 의미한다.

그림 14는 locking 모드로 동작하는 두 번째단 ILCO에서 기준 주파수로부터 100KHz offset 주파수에서의 위상잡음 특성을 보여주고 있다. 측정된 위상잡음 특성은 약 -107dBc/Hz의 우수한 특성을 보였다. 이와같은 결과는 첫 번째단 ILCO와 동일한 값으로써 injection 신호원인 8510C 회로망 분석기가 갖는 약 -110dBc/Hz의 위상잡음 특성을 고려한다면 매우 우수한 특성 값이다.

그림 15는 두 번째단 ILCO의 14MHz locking 대역폭내에서 V_{ds} 의 변화에 따른 미소 주파수 변위량($\omega_{inj} - \omega_0$)을 나타내고 있다. 첫 번째단 ILCO($\omega_{inj} - \omega_0 =$

0)으로 locking된 두 번째단 ILCO는 $\omega_{inj} - \omega_0 = 0$ 인 $V_{ds}=4.3V$ 를 중심으로 locking 전압인 4.0V~5.2V를 선형적으로 가변시킬 때 $\omega_{inj} - \omega_0 = -6.8MHz \sim 6.9MHz$ 를 얻었다.

표 1. ILCO의 성능 규격

Table 1. A performance specification of the ILCO.

Parameters	ILCO	첫 번째단	두 번째단
Fundamental frequency	11.0 GHz		
Voltage tuning range	210 MHz		
Phase noise (locking-mode)	-107dBc/Hz (offset freq.: 100KHz)		
Input power	-14 dBm	-14 dBm	-6 dBm
Output power	12.83 dBm	12.83 dBm	13.5 dBm
Locking BW	11.5 MHz	11.5 MHz	14.0 MHz
ILCO			
$\omega_{inj} - \omega_0 (\omega_{inj} = 11.0GHz)$	-6.8MHz~6.9MHz		
$\Delta\phi$	$\Delta\phi = -78^\circ \sim 80.4^\circ$ (total: 158.4°)		
$\theta (d_s = 0.75 \lambda_0)$	33.4°		

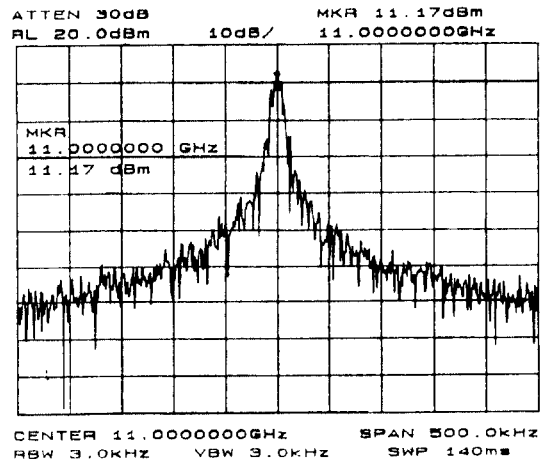
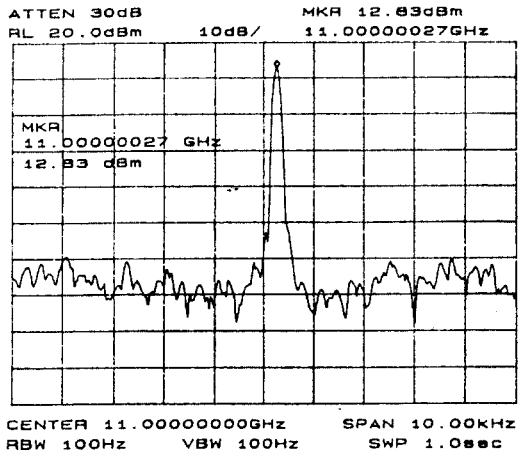
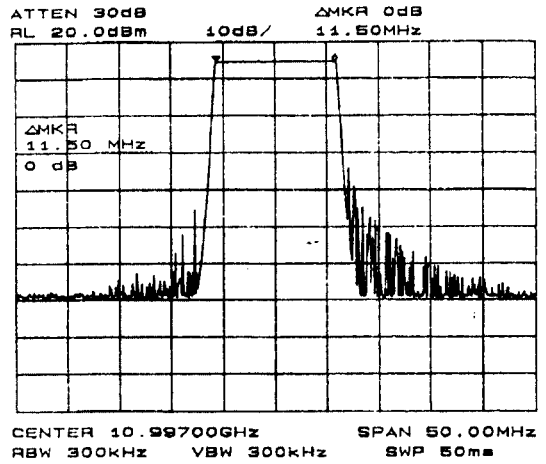


그림 10. ILHRO의 free-running 모드 출력 특성 (span 500kHz)

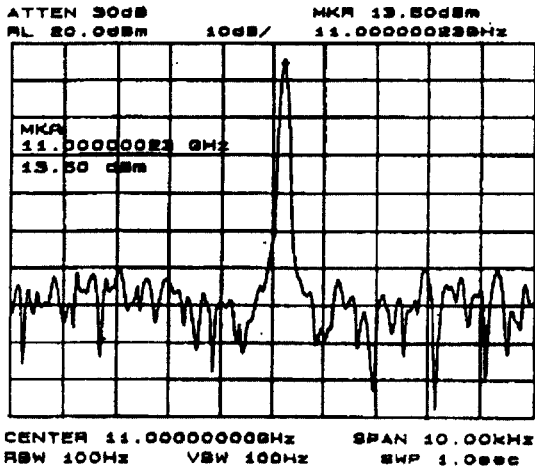
Fig. 10. An output characteristic for free-running mode of the ILHRO(span 500kHz).



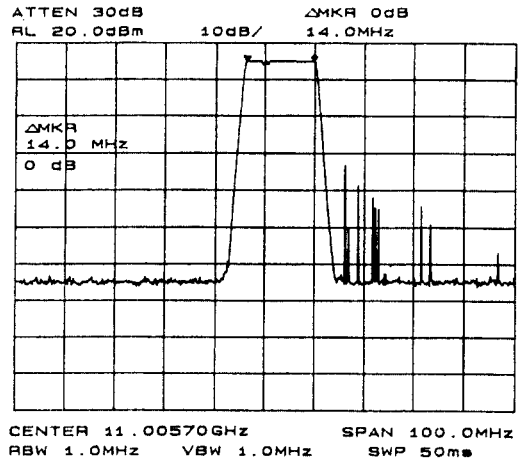
(a) 첫 번째단 ILCO



(a) 첫 번째단 ILCO



(b) 두 번째단 ILCO



(b) 두 번째단 ILCO

그림 11. ILCO의 출력 특성(span 10kHz)

Fig. 11. An output characteristics of the ILCO (span 10kHz).

그림 12. ILCO의 locking 대역폭

Fig. 12. A locking bandwidths of the ILCO.

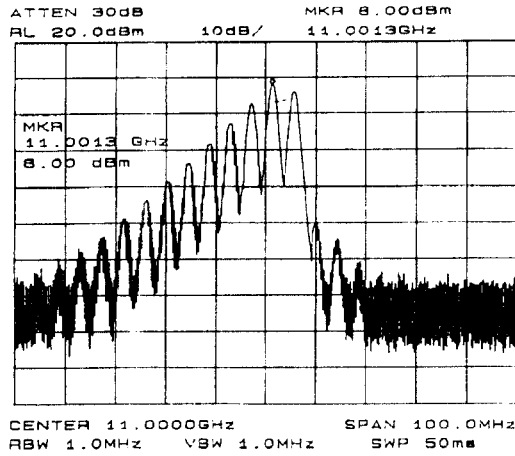


그림 13. ILCO의 unlocking 모드
Fig. 13. An unlocking mode of the ILCO.

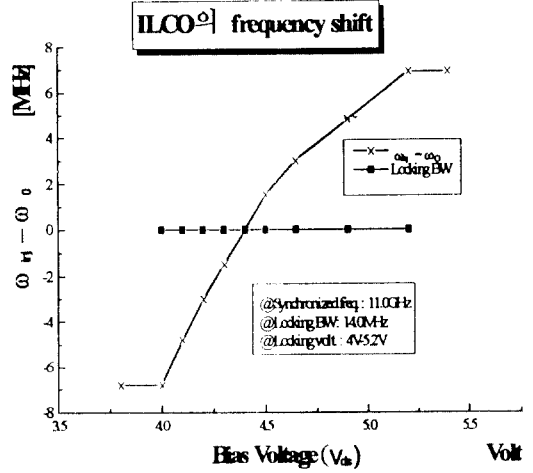


그림 15. 두 번째단 ILCO의 주파수 변위(첫 번째단 ILCO: $V_{ds} = 4.3V$)
Fig. 15. Frequency shift of the second ILCO(First ILCO: $V_{ds} = 4.3V$).

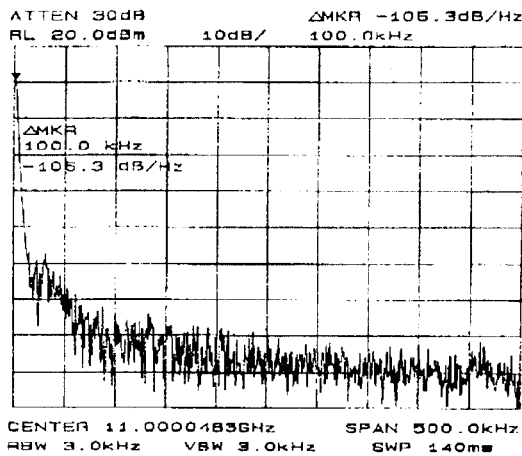


그림 14. 두 번째단 ILCO의 위상잡음 특성(offset freq.: 100KHz)
Fig. 14. Phase noise characteristic of the second ILCO(offset freq.: 100KHz)

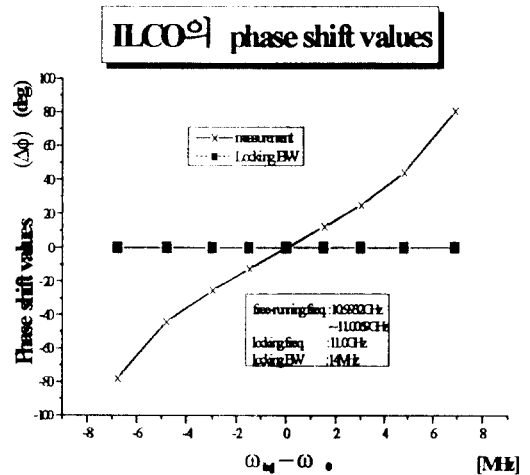


그림 16. ILCO의 위상변위량(첫 번째단 ILCO: $\omega_{in} - \omega_0 = 0$)
Fig. 16. Phase shift values of the ILCO(First ILCO: $\omega_{in} - \omega_0 = 0$).

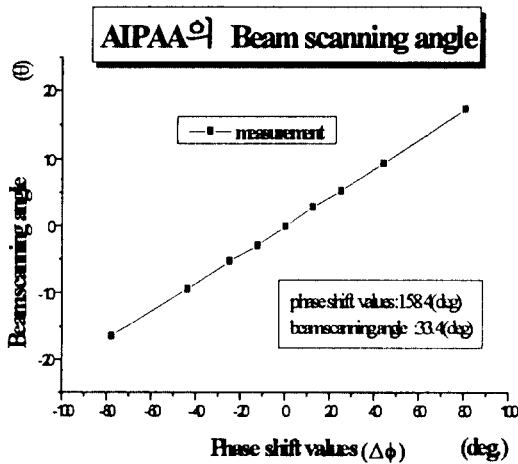


그림 17. AIPAA의 빔 스캐닝 각(첫 번째단 ILCO: $\Delta\phi = 0^\circ$)
 Fig. 17. Beam scanning angle of the AIPAA(First ILCO: $\Delta\phi = 0^\circ$).

그림 16은 그림 15에서 얻은 미소 주파수 변위량에 따른 위상변위 $\Delta\phi$ 값을 나타내고 있다. 첫 번째단 ILCO를 $\omega_{inj} - \omega_0 = 0$ 으로 고정시킨 후 두 번째단 ILCO의 locking 대역폭내에서 $V_{ds} = 4.0V \sim 5.2V$ 로 가변시킬 때 $\omega_{inj} - \omega_0 = -6.8MHz \sim 6.9MHz$ 로 되어 $\Delta\phi = -78 \sim 80.4^\circ$ (total: 158.4°)의 값을 얻었다. 이때 $\omega_{inj} = 11.0GHz$ 로 고정된 값으로써 $V_{ds} = 4.3V$ 에서 0 를 나타내었다. 특히 locking 대역폭의 끝 부분으로 갈수록 $\Delta\phi$ 의 값은 $\omega_{inj} - \omega_0$ 의 변화에 매우 민감해져 위상 변위폭이 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 값은 이론치와 비교할 때 약 10%의 오차를 보여주고 있다.

그림 17은 그림 16에서 얻은 $\Delta\phi$ 값에 의해서 예측할 수 있는 빔 스캐닝 각을 나타내었다. 선형배열된 ILCO가 위상변위기 역할을 할 때 첫 번째단 ILCO와 두 번째단 ILCO 사이에서 측정된 $\Delta\phi = -78^\circ \sim 80.4^\circ$ (total: 158.4°)와 $d_x = 0.75\lambda_0$ 의 값을 AIPAA에 적용한다면 스캐닝 각은 33.4° 로 예측할 수 있다. 이는 이론치의 38.4° 와 비교시 약 5° 의 오차를 보여주며 이와같은 결과는 제작상의 오차로 발생한 결과로 생각된다. 또한 ILCO의 잠음 특성은 게이트단을 50Ω 으로 종단시키므로써 반사되는 신호의 제거로 인한 스푸리어스 성분을 최대한 억제할 수 있었다. 이와 같이 설계, 제작된 ILCO의 최종적인 성능규격을 표 1에 나타내었다.

V. 결 론

본 논문에서는 AIPAA 시스템의 위상변위기 기능을 갖는 능동회로부로서 새롭게 발전된 hair-pin 공진기와 단방향성 증폭기를 이용하여 2단 ILCO를 설계, 제작하였다. 설계, 제작된 ILCO의 병렬결합 회로부와 상호결합 소자로 hair-pin 공진기, 단방향성 증폭기를 이용하므로써 넓은 주파수 가변범위와 locking 대역폭을 얻었다. 특히 단방향성 증폭기에 의한 주파수 동기 및 첫 번째단 ILCO와 비교할 때 두 번째단 ILCO에서 약 20% 향상된 14MHz의 locking 대역폭을 얻었다. 이와 같은 locking 대역폭내에서 $\Delta\phi = 158.4^\circ$ ($-78.0^\circ \sim 80.4^\circ$)의 위상변위량을 얻었으며 이를 기초로 AIPAA에 적용시 33.4° 의 빔 스캐닝 각을 예측할 수 있다. 즉, ILCO는 일정한 locking 대역폭내에서 선형성을 갖는 위상변위가 가능하며 우수한 출력 레벨로 인하여 빠르고 지속적인 위상변위기로 동작할 수 있으리라 본다. 따라서 본 논문에서 설계, 제작한 ILCO는 AIPAA의 위상변위기 뿐만 아니라 mm-wave 대역의 전력결합 소자로 이용할 수 있으며 RF 일체형 안테나에서 송, 수신 모듈화에 따른 MMIC 기법에 응용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. T. Itoh et al., "Active Integrated Antennas," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-42, no. 12, pp. 2186-2194, December 1994.
2. J. Birkeland and T. Itoh, "Two-port FET Oscillators with Applications to Active Arrays," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 1, no. 5, pp. 112-113, May 1991.
3. P. Liao and R. A. York, "A New Phase-Shiftless Beam-Scanning Technique using Arrays of Coupled Oscillators," *IEEE Trans. Micro-wave Theory Tech.*, vol. MTT-41, no. 10, pp. 1810-1815, October 1993.
4. J. Lin, S. T. Chew, and T. Itoh, "A Unilateral Injection-Locking type Active Phased Array for Beam Scanning," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, vol. 2, pp. 1231-1234, May 1994.
5. K. Kurokawa, "Injection Locking of Microwave

