

능동 위상배열 안테나를 위한 Single-Stage Transmission Type Injection-Locked Oscillator(STILO)의 설계 및 제작

正會員 이 두 한*, 김 교 현**, 홍 의 석**

The Single-Stage Transmission Type Injection-Locked Oscillator was Designed and Fabricated for the Active Integrated Phased Array Antenna

Du Han Lee*, Kye Hun Kim**, Ui Seok Hong** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 Active Integrated Phased Array Antenna(AIPAA) 시스템을 위한 Single-stage Transmission type Injection-Locked Oscillator(STILO)를 설계, 제작하였다. Injection-locking 기법과 hair-pin 공진기(resonator)를 이용하여 설계, 제작된 STILO는 바랙터를 이용한 Voltage Controlled Oscillator(VCO)에 상응하는 210MHz의 주파수 가변범위(tuning range)와 Injection-Locked Dielectric Resonator Oscillator (ILDRO)보다 월등히 개선된 11.5 MHz의 locking 대역폭을 얻을 수 있었으며 또한 AM, FM 및 PM 등의 우수한 잡음 특성을 얻었다. 이와 같이 제작된 STILO는 AIPAA, coupled VCO array와 MMIC에 적합한 구조이다.

Abstract

In this paper, the Single-stage Transmission type Injection-Locked Oscillator(STILO) was designed and fabricated for the Active Integrated Phased Array Antenna(AIPAA) system. The STILO, which was designed and fabricated by injection-locked technique and hair-pin resonator, has the same 210MHz frequency tuning range of the Voltage Controlled Oscillator(VCO) used by varactor. The locking bandwidth of STILO with 11.5MHz bandwidth, is much better than that of the Injection-Locked Dielectric Resonator Oscillator(ILDRO), And the STILO has the improved noise characteristics in AM, FM, and PM. This STILO is useful for the AIPAA, the coupled VCO array, and the MMIC structure.

*광운대학교 전자통신공학과
Department of Electronic Communication Engineering
**광운대학교 전자공학과(신기술 연구소 연구원)

Department of Radio Science & Engineering
論文番號:96015-0112
接受日字:1996년 1월 12일

I. 서 론

최근 이동체에서 위성을 이용한 통신 및 위성 방송 등 다양한 형태의 통신 서비스 수요에 능동적으로 대처하기 위한 소형 안테나에 대한 기술 개발이 크게 대두되고 있는 실정이다. 소형 안테나로는 고효율, 고이득 특성을 지닌 평면구조의 마이크로스트립 배열 안테나가 가장 적합하다. 한편 다이오우드, GaAs FET 등과 같은 능동소자로 구성된 능동 회로와 마이크로스트립 패치 안테나를 동일 기판상에서 설계하여 이동체의 움직임에 따른 빔 형성, 빔 주사 기능이 가능한 Active Integrated Phased Array Antenna (AIPAA)에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 또한 집적화된 AIPAA에서 능동회로인 발진기를 각각 독립적으로 조절하여 빔을 전자적으로 주사하므로써 위상변위기를 대체할 수 있는 효율적인 방법도 제안되었다[1]. 이와같은 AIPAA를 효율적으로 동작 시키기 위하여 위상잡음, 주위환경에 대한 정상적인 동작을 보장하며, 가변 전압에 대한 선형성 및 넓은 주파수 가변범위를 갖는 능동 회로부가 필요하게 되었다.

따라서 본 논문에서는 injection locking 기법을 이용한 고안정 Single-stage Transmission type Injection-Locked Oscillator(STILO)를 설계, 제작하였다[2]-[5]. 전송형 증폭기를 이용한 발진기를 구현할때 발진을 유도하며 발진 주파수를 결정하는 병렬 케환 요소로써 링공진기와 유전체 공진기(DR) 대신에 hair-pin 공진기를 이용하였다. hair-pin 공진기는 2차원 평면 구조로써 링공진기의 단점이라할 수 있는 Q-factor의 값을 개선할 수 있으며 크기를 줄일 수 있고 3차원 구조의 DRO에 비하여 보다 넓은 주파수 가변범위, locking 대역폭을 갖으며 DRO에서와 같은 기계적 튜닝이 아닌 집적화로 인한 설계, 제작상의 오차를 최대한 줄일 수 있다. 따라서 본 논문에서 설계, 제작된 STILO는 위상배열 안테나의 에너지원으로 이용될 뿐만아니라, coupled VCO array, push-push oscillator 등에 적용할 수 있으며, 고 집적화에 따른 MIC 및 MMIC에 적합한 구조라 할 수 있다.

II. Single-stage Transmission type Injection-Locked Oscillator

Injection-locking에 대한 이론은 1920년 Van der Pol에 의하여 처음 이론적으로 정립되었으며 Kurokawa에 의한 실험을 통하여 타당성을 입증하였다. ILO는 일반적인 free-running 발진기에 비하여 보다 우수한 AM, FM, 그리고 PM 잡음 특성을 갖을 뿐만아니라 출력 레벨이 증폭되는 장점도 있다[3].

Injection locking 기법은 free-running 발진기에 locking 신호인 외부 RF 신호를 인가하는 방법으로써 반사형 ILO와 전송형 ILO로 구분된다. 반사형 ILO는 free-running 발진기의 출력 단자에 locking 신호를 인가하는 방법으로써 2-port 소자에 적합한 반면에 Tajima와 Mishima에 의해 제안된 전송형 ILO는 3-terminal 소자에 적합한 형태로써 free-running 발진기의 입력단에 locking 신호원인 외부 RF 신호를 인가하여 locking 신호와 RF 출력단을 분리시켰다. 따라서 반사형 ILO에 비하여 보다 넓은 주파수 가변범위와 locking 대역폭을 얻을 수 있으며, 또한 일정한 locking 이득을 갖을 경우 낮은 FM 잡음 특성과 일정한 locking 대역폭에서 높은 이득을 갖는다.

또한 Berceci와 Daryoush에 의해 제안된 double-stage transmission type ILO는 DR과 double-stage 증폭기를 이용하여 높은 이득과 향상된 위상 잡음을 갖는 반면에 소자 수가 증가되어 회로 전체의 크기가 커지며 DR을 이용하므로써 높은 Q-factor에 따른 locking 대역폭의 한계 및 3차원 구조에 의한 MMIC구현시 제약을 받는다[4]. 따라서 본 논문에서는 double-stage transmission type ILO에 상응하는 높은 이득과 위상 잡음 특성을 얻을 수 있으며 DR 대신에 마이크로스

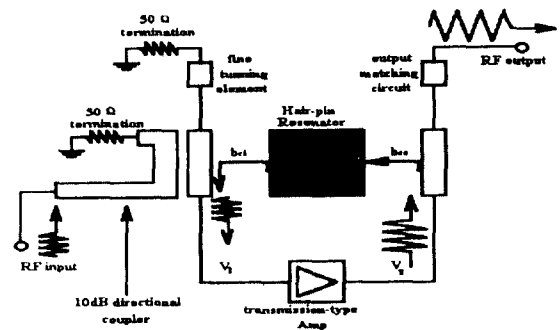


그림 1. STILO의 블럭도
Fig. 1. A block diagram of the STILO.

트립 선로를 이용하여 2차원 평면구조의 hair-pin 공진기로써 STILO를 구현하였다. 그림 1은 본 논문에서 구현한 ILO의 일종인 병렬케환 STILO에 대한 블록도를 나타낸 것이다[5]. STILO의 locking 대역폭을 나타내기 위하여 입, 출력단 전압 결합계수를 b_{ci} , b_{co} 로 나타내었으며 케환전압을 V_1 , V_2 로 표현하였다. 케환인자로 이용된 hair-pin 공진기의 구성도와 병렬 결합선로의 길이에 따른 주파수 특성 그래프를 그림 2에 나타내었다.

그림 2-(a)의 회로도에 대한 공진조건은 $\theta_{pe} = P_{po} = \theta_p$ 일때 식 (1)과 같이 표현되며 기수모드와 우수모드에 대한 공진조건은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$(Z_{pe} Z_{po} \cot \theta_p - Z_s^2 \tan \theta_p) \sin \theta_s$$

$$+ Z_s(Z_{pe} + Z_{po}) \cos \theta_s - Z_s(Z_{pe} - Z_{po}) = 0 \quad (1)$$

$$\text{기수모드: } \tan(\theta_s/2) \tan \theta_p = K_o = Z_{po}/Z_s = 0 \quad (2a)$$

$$\text{우수모드: } \tan(\theta_s/2) \tan \theta_p = K_e = Z_{pe}/Z_s = 0 \quad (2b)$$

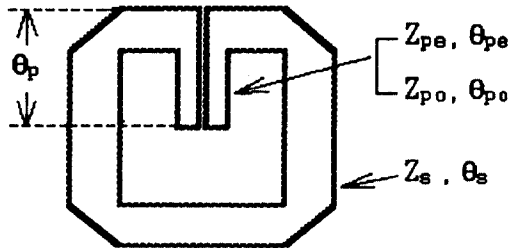
여기서, Z_s , θ_s : single line의 특성 임피던스, 전기적 길이

Z_{pe} , Z_{po} : 병렬 결합선로의 우수, 기수모드의 임피던스

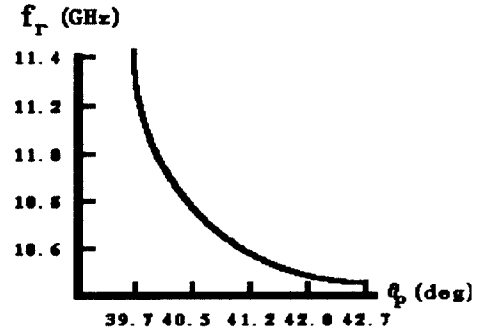
θ_{pe} , θ_{po} : 병렬 결합선로의 우수, 기수모드의 전기적 길이

θ_p : 병렬 결합선로의 전기적 길이

기준 공진 주파수는 식 (2a)와 같은 기수모드에서 발생되며 고차 공진주파수는 우수모드에서 발생된다. 따라서 병렬 결합선로(θ_p)의 길이를 조정함으로써 정교한 튜닝이 가능한데 이에 대한 특성을 그림 2-(b)에 나타내었다.



(a) 회로도



(b) 병렬 결합선로의 주파수 특성

그림 2. Hair-pin 공진기의 특성

Fig. 2. A characteristics of the hair-pin resonator.

또한 free-running 동작시 hair-pin 공진기는 대역통과 필터로써 동작하며 이때 필터의 주파수 특성을 결정하는 외부-Q(Q_{ext})의 값은 다음과 같은 간략화된 식으로 표현할 수 있다.

$$Q_{ext} = \frac{2}{\Omega_1} \sqrt{L_0}, \quad \Omega_1 = |\omega_1/\omega_0 - \omega_0/\omega_1| \quad (3)$$

여기서, ω_0 는 공진 각주파수, ω_1 은 -3dB down point에서의 각주파수, L_0 는 공진 각주파수에서의 삽입 손실을 나타낸다.

한편 injection locking된 STILO의 입력 전압 V_1 은 케환 전압과 injection 신호 전압의 합으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_1 = V_2 b_c T + V_i \quad (4)$$

여기서, b_c 는 전체 전압 케환 결합계수($b_{ci} \cdot b_{co}$), T 는 hair-pin 공진기의 전압 전달함수로써 $T = T_r + jT_i$ 이고 V_i 는 injection 신호의 전압으로 $V_i = V_{ir} + jV_{ii}$ 인데 free-running 동작시 $V_{ir} = V_{ii} = 0$ 이다. 따라서 locking 범위내에서 동작 주파수는 injection 신호에 의해 결정됨을 보여주며 free-running시 발진 주파수는 hair-pin 공진기의 공진 주파수에 고정된다. 이때 식 (4)로부터 발진조건을 만족시키기 위한 조건은 $b_c > 1/A$ 이 되며 이때 A 는 증폭기의 전압이득이다.

또한 injection locking 신호의 위상은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-b_c V_2 T_i}{V_{ir}} \right) \quad (5)$$

free-running 모드로 동작하는 발진기가 injection locking 신호에 의하여 locking 됐을때 ILO의 중요한 변수인 locking 대역폭은 다음과 같다.

$$B \approx \frac{1}{Q_{ext} b_c} \sqrt{\frac{P_i}{P_o}} \quad (6)$$

즉, locking 대역폭은 레환 결합 계수 b_c 와 Q_{ext} 에 반비례하며 b_c 는 전압 이득 A에 반비례하므로 전압이득을 증가시킴으로써 locking 대역폭은 증가한다.

따라서 hair-pin 공진기를 이용한 발진기가 DR을 이용한 발진기 보다 넓은 locking 대역폭을 갖는다. 이는 Q_{ext} 값이 작은 마이크로스트립 선로를 이용함으로써 구현할 수 있음을 보여준다.

III. 설계 및 제작

본 논문의 STILO는 상용 마이크로웨이브 CAD인 HP사의 MDS b.06을 이용하여 시뮬레이션하였다. STILO를 구성하는 각 단의 회로부를 각각 초기 설계한 후 하나의 회로로 결합하여 설계 조건에 만족하도록 최적화하였다. 시뮬레이션은 크게 4단계를 통하여 이루어졌다. 광대역 특성을 갖는 single-stage 증폭기를 설계한 후 레환 인자로써 발진을 유도하고 공진 주파수를 결정하는 hair-pin 공진기 필터를 설계 규격에 준하여 설계하였으며 locking 신호인 외부 RF신호를 인가하기 위하여 -10dB 방향성 결합기(directional coupler)를 설계하였다. 이와같이 설계된 각각의 회로를 하나의 집적화된 회로로 최적화하여 시뮬레이션하였다. single-stage 증폭기의 능동소자로는 저잡음 지수를 가지며 위상 섭동을 최소화 할 수 있는 Avantek사의 GaAs MESFET인 ATF13036을 이용하였으며 제작사에서 제공하는 data sheet상의 S-parameter를 기초로 MDS에서 지원 가능한 Curtice Cubic Modelling 방법으로 비선형 모델화 하였다. 선형 동작시 최대 출력과 광대역 특성을 갖도록 모델화된 ATF13036 소자로서 single-stage 증폭기를 설계한 후 발진주파수를 결정하는 병렬레환 회로부는 게이트와 드레인단의 마이크로스트립 선로와 hair-pin 공진기 사이의 역

위상(antiphased) 결합 관계를 이용하여 결합 길이와 능동레환 루프의 길이를 최적화하였다. 그림 3은 hair-pin 공진기 필터의 설계 주파수인 11GHz에서 삽입손실이 -0.7dB이며 반사손실이 -24dB인 대역 통과 특성을 나타낸다. 따라서 hair-pin 공진기 필터가 갖는 각각의 전기적 파라미터 값은 다음과 같다.

$$Z_s = 50, \theta_s = 104(\text{deg}), Z_{pe} = 89.2, Z_{po} = 28, Q_{ext} = 148$$

그림 4는 본 논문의 설계 주파수인 11GHz에서 STILO의 발진 가능성을 나타낸다. 이는 능동레환 루프와 hair-pin 공진기의 병렬 결합선로 길이를 조절하여 설계 주파수인 11GHz에서 위상이 "0"을 교차하고 공진기와 결합선로와의 결합각을 조절하여 크기가 "1"보다 큰 값을 갖도록 최적화함으로써 초기 발진조건을 만족시켰다.

그림 5는 발진조건을 만족한 발진기의 출력 특성을 미리 예측함으로써 시뮬레이션에서 얻은 결과와 실제 제작 후 실험상의 오차를 최대한 줄이기 위하여 비선형 해석 방법인 harmonic balance로 주파수영역에서 해석한 결과를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 기준 주파수인 11GHz에서 높은 출력과 2차 고조파간의 차이가 현저히 증가함을 볼 수 있으며 따라서 출력 신호가 이상적인 정현파로써 안정된 잡음 특성을 갖는다. 이는 외부에서 인가되는 injection 신호를 -10dB 방향성 결합기를 이용하여 구현할때 게이트단을 50으로 종단시킴으로써 단락회로가 되어 반사되는 신

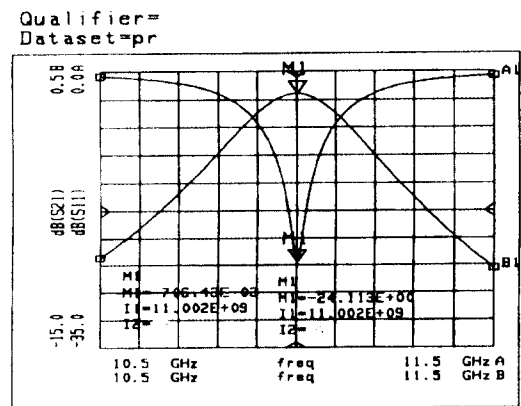


그림 3. Hair-pin 공진기 필터의 대역 통과 특성
Fig. 3. A bandpass characteristic of the hair-pin resonator filter.

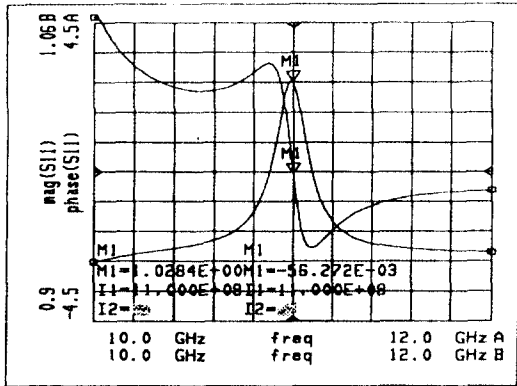


그림 4. Free-running 발진기의 발진가능성
Fig. 4. Oscillation possibility of the free-running oscillator.

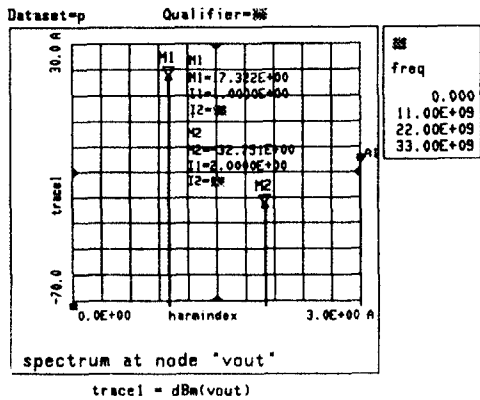


그림 5. STILO의 비선형 특성
Fig. 5. A nonlinear characteristic of the STILO.

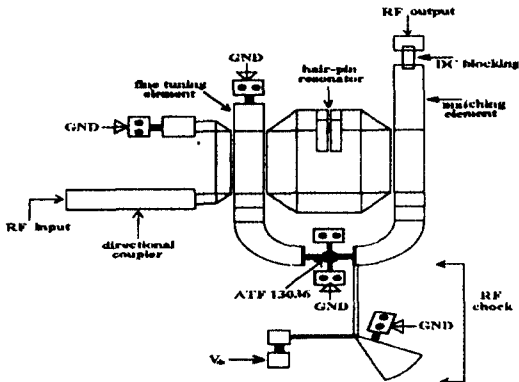


그림 6. STILO의 회로도
Fig. 6. Layout diagram of the STILO.

호가 제거되므로 스푸리어스 성분과 히스테리시스 현상을 억제할 수 있다. 그림 6은 최적화하여 설계된 STILO의 layout 형태를 나타낸다. 이와 같이 layout 된 STILO는 일본 Chukoh사의 Teflon 기판인 $\epsilon_r = 2.6$, $h = 0.54\text{mm}$ 로써 제작하였다.

IV. 측정결과 및 분석

설계, 제작된 STILO는 HP-8510C 회로망 분석기를 injection 신호원으로 이용하였으며 출력 특성은 HP-8563E 스펙트럼 분석기로 측정하였다. single-stage 증폭기의 V_{ds} , I_{ds} 값이 2.5V, 20mA가 되도록 인가전압을 가변시켜 회로망 분석기로 측정한 결과 이득이 약 10dB 출력과 광대역성을 갖는 증폭기로 동작함을 보였다. injection port를 50Ω으로 종단시킨 후 free-running 모드에서 $V_{ds} = 2.1\text{V}$ 인가시 초기 발진 가능성을 보였으며 $V_{ds} = 4.3\text{V}$ 에서 설계주파수와 일치하는 11GHz에서 정상 상태로 동작하였고 5.5V에서 포화되었다.

그림 7은 span 500 kHz에서 free-running 모드와 injection-locking 모드로 동작시 측정된 출력 스펙트럼이다. (a)는 free-running 모드로 동작하는 경우로써 출력 특성이 11GHz에서 11.17dBm인 반면에 (b)는 free-running 모드로 동작하는 발진기에 -10dB 방향성 결합기를 이용하여 11GHz, -14dBm의 locking 신호를 인가할때 free-running 모드는 locking 신호에 동기되어 11GHz에서 13.83dBm의 출력과 AM, FM, 및 PM 잡음 특성이 월등히 개선된 안정된 locking 모드로 동작한다. 또한 방향성 결합기를 이용하므로써 입력단의 특별한 정합회로 없이 출력 레벨이 증가되는 결과를 얻었다. 그림 8에서는 injection-locking 모드로 동작시 span 10kHz상에서 측정된 출력 스펙트럼이다. free-running 모드와 비교할때 zoom span에서도 주파수 안정도가 개선된 출력 특성을 얻었다.

그림 9는 span 500kHz 대역의 기준 주파수로 부터 100kHz offset된 상태에서 free-running 모드와 injection-locking 모드에서의 위상 잡음 특성을 측정한 결과이다. 그림 9 (a), (b)에서와 같이 발진기 성능을 좌우하는 위상 잡음 특성이 free-running모드에서 얻은 -84.44 dBc/Hz보다 월등히 개선된 -107.9dBc/Hz의 위상 잡음 특성을 나타내었다. 즉, injection 신호가 갖는 본래의 위상 잡음을 고려한다면 injection-locking 모드에

서의 close-in carrier 잡음 특성은 free-running 발진기의 내부잡음에 무관하며 injection-locking 신호의 잡음 레벨에 의해 좌우됨을 보여준다.

그림 10은 외부에서 인가되는 전압인 V_{ds} 값에 따른 주파수 가변범위를 나타낸 것으로써 free-running 모드의 기준 주파수인 11GHz를 중심으로 인가 전압을 3.5V에서 5.3V까지 가변시켰을때 출력 전력이 ± 1 dBm의 범위 내에서 약 210MHz의 주파수 가변범위를 얻었다. 즉, hair-pin 공진기를 이용한 전송형 발진기를 설계시 기대했던 넓은 주파수 가변범위를 얻었으며 바랙터 다이오드를 이용한 VCO에 상응하는 선형성을 갖는 주파수 가변범위를 얻었다. 또한 그림 11에서는 locking 모드로 동작할때 locking 대역폭을 측정 한 결과 DR을 이용한 ILO보다 월등히 개선된 약 11.5 MHz의 값을 얻었다. 즉, Q_{ext} , b_c 값에 의해서 결정되는 locking 대역폭은 hair-pin 공진기를 이용하므로써 월등히 개선된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

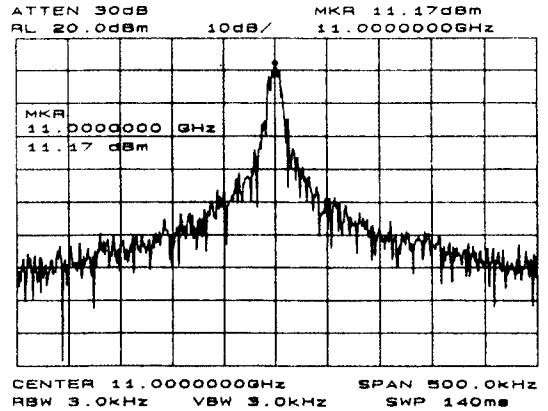
그림 12는 full span에서 고주파 특성을 측정 한 것으로써 기준 주파수와 2차 고조파간의 출력 레벨 차이는 -46.6dBc 로써 우수한 고조파 억제량을 보이고 있으며 스퓨리어스 특성은 백색 잡음만을 포함하고 있다. 즉, 게이트단을 5Ω 으로 종단시키므로써 스퓨리어스 성분, 히스테리시스 등과 같은 잡음을 최대한 억제할 수 있음을 알 수 있다. injection 신호의 입력 레벨에 따른 출력 레벨의 AM 억압 특성을 측정하기 위해 감쇄기를 이용하여 injection 신호를 -20dBm~-10dBm까지 변화시켰을때 출력 전력이 거의 일정함을 볼 수 있었으며 기준 locking 신호에서 locking 이득은 20dB이다. 또한 출력스펙트럼의 sideband가 대칭구조를 나타내는 것으로 보아 위상변조 역시 free-running 모드에 비해 크게 개선되었음을 알 수 있었

표 1. STILO의 성능 규격

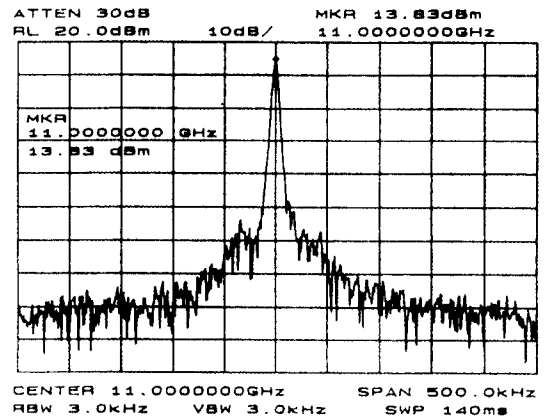
Table 1. A performance specification of the STILO

Fundamental frequency	11 GHz
Voltage tuning range(free-running mode)	210 MHz
Locking BW(injection power:-14dBm)	11.5 MHz
Output power(injection-locking:span500kHz)	13.83 dBm
Injection gain(injection power:-14dBm)	>20 dB
Harmonic below center	-46.6 dBc
Phase noise(100kHz offset)	-107.9 dBc/Hz

다. 이와 같이 설계, 제작된 STILO의 성능규격을 표 1에 나타내었다.



(a) free-running 모드



(b) injection-locking 모드

그림 7. STILO의 출력 특성 (span 500kHz)

Fig. 7. An output characteristics of the STILO(span 500kHz).

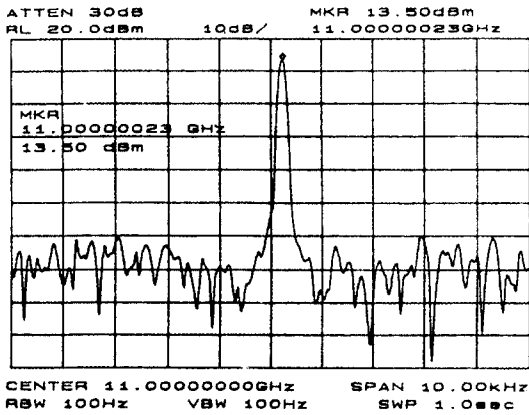
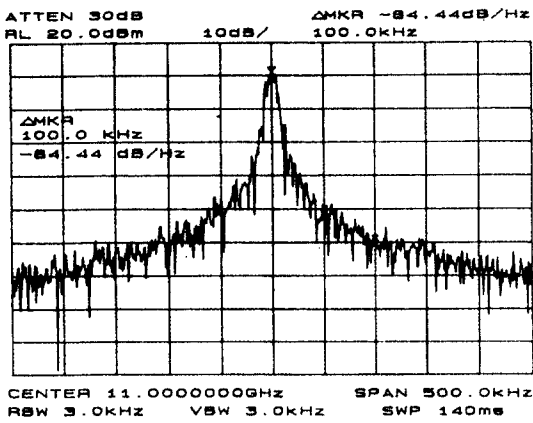
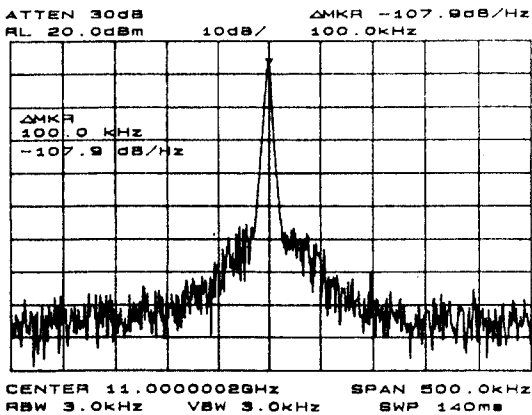


그림 8. STILO의 출력 특성 (span 10kHz)
Fig. 8. An output characteristic of the STILO (span 10kHz).



(a) free-running 모드



(b) injection-locking 모드

그림 9. STILO의 위상 잡음 특성
Fig. 9. A phase noise characteristics of the STILO.

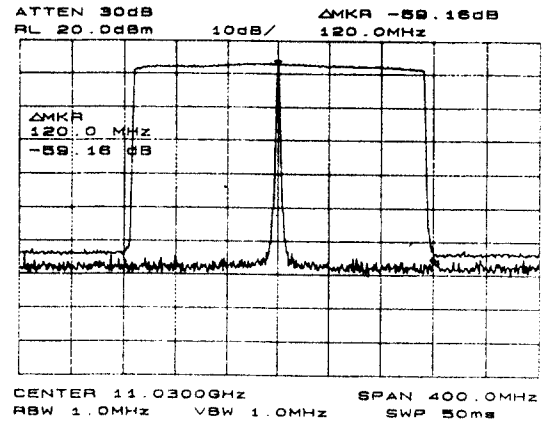


그림 10. STILO의 주파수 가변범위
Fig. 10. A frequency tuning range of the STILO.

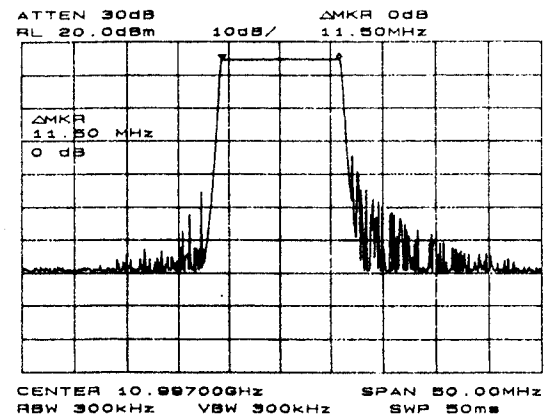


그림 11. STILO의 locking 대역폭
Fig. 11. A locking bandwidth of the STILO.

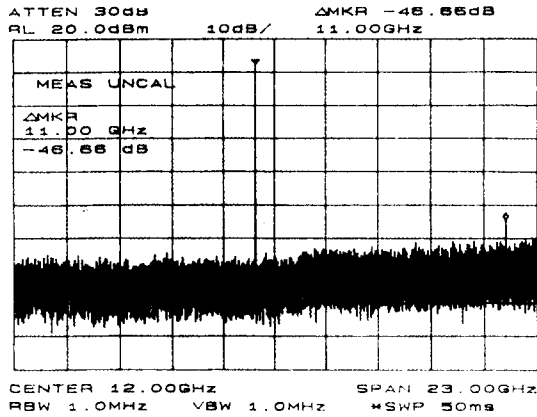


그림 12. STILO의 고조파 특성
Fig. 12. A harmonics characteristic of the STILO.

V. 결 론

본 논문에서는 AIPAA를 효율적으로 동작시키기 위한 능동회로부로서 새롭게 발진된 hair-pin 공진기와 injection locking 기법을 이용하여 넓은 주파수 가변범위, 저잡음 특성을 갖는 STILO를 설계, 제작하였다.

이와같이 설계, 제작된 STILO에 대한 측정 결과 210MHz의 주파수 가변범위, -107.9dBc/Hz(locking 모드)의 위상잡음 특성 및 11.5MHz의 locking 대역폭을 얻었으며 또한 양호한 AM 억압 특성과 AM, FM 등의 우수한 잡음 특성을 얻었다. 한편 injection-locking 모드에서의 close-in carrier 잡음 특성은 free-running 발진기의 잡음에 무관하나 close-out carrier 잡음 특성은 free-running 발진기의 잡음에 크게 영향을 받는다. 따라서 부성저항 기법을 이용하여 hair-pin 공진기의 Q-factor값을 좀 더 개선한다면 더욱 안정된 위상잡음 특성을 얻을 수 있다. 이와같이 본 논문에서 설계, 제작한 STILO는 inter-injection locking을 이용한 coupled VCO array와 빔 scanning을 위한 능동 위상배열 안테나(active phased array antenna)에 적합하며 MMIC 구현시 매우 용이한 구조이다.

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. Y. Tajima, "GaAs FET applications for injection-locked oscillations and self-oscillating mixers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, no. 7, July 1979.
3. K. Kurokawa, "Injection locking of microwave solid state oscillators," *Proc. of the IEEE*, vol. 61, no. 10, pp. 1386-1407, October 1973.
4. T. Berceci, A. S. Daryoush et al., "A double-stage Injection-locked oscillator for optically fed phased array antennas," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-39, no. 2, pp. 201-208, February 1991.
5. M. Sagawa, K. Takahashi and M. Makimoto, "Miniaturized hair-pin resonator filters and their application to receiver front-end MIC.s," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-37, no. 12, pp. 1991-1997, December 1989.

이 두 한(Du Han Lee)

정희원

한국통신학회 논문지 제20권 제12호 참조



김 교 현(Kye Hun Kim) 정희원

1970년 9월 14일생

1994년 8월: 호서대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)

1994년 8월~현재: 광운대학교 산업정보대학원 전파공학과 석사과정

※주관심분야: 초고주파회로설계(MIC 및 MMIC) 및 안테나

홍 의 석(Ui Seok Hong)

정희원

한국통신학회 논문지 제20권 제12호 참조