
고출력, 저위상잡음 Ku-대역 위상동기발진기설계

민상보* · 이영철*

Design of the Ku-band Phase Locked Oscillator for high power
and low phase noise.

Min Sang-Bo* · Rhee Young-Chul*

본 논문은 2002년도 경남대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어졌음

요 약

본 논문에서는 저 위상잡음과 고출력 특성을 나타내는 Ku-대역 위상동기발진기를 설계하였다. 발진기소자의 비 선형 파라미터를 분석하여 위상잡음과 발진기출력에 영향을 주는 파라미터의 관계를 최적화시켜 저 위상잡음과 고 출력 특성을 절충되는 바이어를 구하였다. 위상동기 발진기의 고 안정 특성을 위하여 전치분주형으로 설계하였으며 실험한 결과 위상동기된 상태에서 발진기출력은 10.17dBm이었으며 위상잡음은 13.25GHz에서 10KHz 떨어진 주파수에서 -82dBc/Hz을 보여 10dBm의 출력과 -84dBc/Hz@10KHz에 매우 근접함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The phase locked oscillator having a low phase noise and high output in Ku-band was designed. To obtain the low phase noise and high output characteristics of oscillator, the nonlinear equivalent circuits of p-HEMT was analyzed by TOM method and we have decided the trade-off bias point between the low phase noise and the output power of oscillator. The designed phase locked oscillator with prescaler for stable operation, experiment results exhibits output power of 10dBm with phase noise in the phase locked state of -82dBc/Hz at 10KHz offset from 13.25GHz, and simulation result of 10dBm output power in the phase noise -84dBc/Hz at 10KHz offset frequency respectively. a good agreement has been obtained between simulations and experiments results.

1. 서 론

고도화된 통신시스템은 디지털화, 다 채널화 (Multi-channel)로 발전하고 있으나 이용하는 주파수대의 제한성 때문에 많은 정보량을 처리하기 위해 준/밀리미터파 대역을 이용하고 있으며 Ka-대역과 같은 높은 주파수를 이용한 위성통신/중계시스템과

B-WLL에 의한 광대역 무선 시스템은 IVDS (interactive video and data service)와 같은 쌍방향 통신에 의한 무선 디지털 전송에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다[1-3].

이와 같은 디지털 마이크로파 통신의 수신시스템에서 국부발진기는 근접채널간섭과 수신기의 수신감도에 직접적으로 영향을 미치며[4,5] 특히 QPSK 및

QAM과 같은 디지털 변조신호에 따른 코헤어런트 신호는 직접적으로 영향을 미치며 마이크로파 수신 시스템에서 주로 이용하고 있는 헤테로다인형 수신기에서 국부발진기의 안정도와 위상잡음(phase noise)은 수신감도에 직접적으로 영향을 미치므로 고안정 특성과 저 위상잡음특성을 동시에 나타내는 국부발진기를 필요로 한다.

저 위상잡음의 발진기를 설계하기 위하여 여러 가지 방안이 제시[6]되고 있으나 본 연구에서는 마이크로파 발진기를 설계함에 있어서 저 위상잡음특성은 마이크로파 발진기의 능동소자(pHEMT)의 비선형 등가파라미터에서 위상잡음에 영향을 주는 비선형 파라미터를 분석하고 등가모델링에 의한 귀환발진기를 설계함으로써 발진기의 출력과 저 위상잡음사이를 절충(trade-off)함으로 비교적 큰 출력을 내는 저 위상잡음 마이크로파 발진기를 설계하고자 하며 발진기의 고안정 특성을 위하여 국부발진기는 높은 Q값을 나타내는 고유전율 DR발진기에 마이크로파 분주기(prescaler)를 적용시켜 마이크로파 위상동기발진기를 설계하므로써 디지털 마이크로파 통신시스템의 고안정 국부발진기로서 동작을 분석하고자 한다.

II. 마이크로파 발진기의 위상잡음 모델링

일반적으로 마이크로파 발진기의 출력신호는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)] \quad (1)$$

위 식에서 ω_0 는 반송각주파수이며 $\theta(t)$ 는 위상잡음성분이고 $A(t)$ 는 신호의 크기를 나타내고 있다. 위 식 (1)에 대하여 삼각함수를 적용하고 정리하면

$$S(t) = A(t) \cos\left[\omega_0 t + \frac{\Delta f_m}{f_m} \sin \omega_m t\right] \quad (2)$$

이며 이때 위상은

$$\theta(t) = \frac{\Delta f_m}{f_m} \sin(\omega_m t) \quad (3)$$

으로 표현하였다. 위 식을 정리하면

$$S(t) = A(t) \left\{ \cos(\omega_0 t) \cdot \cos\left(\frac{\Delta f_m}{f_m} \sin \omega_m t\right) - \sin \omega_0 t \cdot \sin\left(\frac{\Delta f_m}{f_m} \sin \omega_m t\right) \right\} \quad (4)$$

가 되며 $\Delta f_m/f_m$ 은 위상편차가 된다. 위상잡음은 매우 협대역에서 FM형태이므로 $X \rightarrow 0$ 일 때 $\sin(x) \approx x$ 및 $\cos(x) = 1$ 을 고려하여 정리하면

$$S(t) = V(t) \left\{ \cos(\omega_0 t) - \frac{\Delta f}{2f_m} \cos(\omega_0 t + \omega_m)t + \frac{\Delta f}{2f_m} \sin[(\omega_0 + \omega_m)t] \right\} \quad (5)$$

이므로 위 식은 DSB-변조된 신호의 형태로서 기본적으로 반송주파수 f_0 와 양측파대에서 $(f_0 - f_m)$ 와 $(f_0 + f_m)$ 을 나타내며 발진주파수 양단에서 위상-잡음간의 영향에 의하여 형성된다. 발진기의 위상잡음의 모델링은 Leeson 모델을 기본으로 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$L(f_m) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{f_m^2} \left(\frac{f_0}{2Q_L} \right)^2 \right] \frac{NFkT}{P_{avs}} \left(1 + \frac{f_c}{f_m} \right) = \frac{NFkTB}{2P_{avs}} \left[\frac{1}{f} + \frac{f_c}{4Q_L^2} + \frac{1}{f} \left(\frac{f}{2Q_L} \right)^2 + \frac{f_c}{f_m} + 1 \right] \quad (6)$$

이 식에서 발진기의 위상잡음을 감소시키려면 발진기의 Q값을 최대로 하고, 가능한 능동소자의 잡음지수(NF)가 작고 입력단의 고-임피던스특성을 나타내는 FET 계열의 소자를 이용하여 위상섭동(phase perturbation)현상을 감소시킬 수 있으며 특히 flicker 잡음이 적은 능동소자를 선정하여 발진기 설계할 때 flicker 잡음을 감소시키는 귀환 방안을 선정해야 한다[8].

마이크로파 능동소자에 의한 발진기의 설계에 있어서 능동소자의 잡음지수에 가장 크게 영향을 미치는 등가 파라미터는 입,출력단의 캐패시턴스이며 이 값은 능동소자의 바이어스에 의한 비선형 모델링에 의하여 결정할 수 있으므로 저 위상잡음 발진기를 설계할 때 능동소자의 잡음지수와 저 위상잡음 및

안정된 출력을 나타낼 수 있도록 비선형 등가소자에 대하여 분석하기 위하여 p-HEMT에 대한 등가모델은 그림(1)과 같이 나타내며 그림에서 순수잡음이 없는 FET와 게이트 및 드레인 잡음전류원, 게이트와 소스저항에 대한 열 잡음이 포함되어 있으며 이때 게이트와 드레인 전류잡음은 각각[9,10]

$$\overline{id^2} = 4kTg_mP\Delta f \quad (7a)$$

$$\overline{ig^2} = 4kT\Delta fC_{gs}^2\omega^2R/g_m \quad (7b)$$

으로 상관효과를 제외하고 있으며 세 개의 등가 파라미터(R,P 및 C)는 능동소자의 제조공정과 바이어스에 의하여 결정되는 파라미터로서 R은 게이트 잡음 계수이고, P는 드레인 잡음계수이며 C는 게이트와 드레인사이의 상관계수로서 다음 식으로 정의된다[10].

$$C = \frac{\overline{ig id^4}}{\sqrt{\overline{ig^2} \cdot \overline{id^2}}} \quad (8)$$

능동소자의 잡음지수는 다음 식으로 정의된다[10].

$$NF = NF_{\min} + \frac{R_N}{G_S} |Y_S - Y_0|^2 \quad (9)$$

식(6)과 (9)에 의하여 잡음등가소자는 위상잡음에 직접적으로 영향을 미치므로 능동소자의 비선형 소자에 대한 해석이 반드시 이루어져야 함을 알 수 있다.

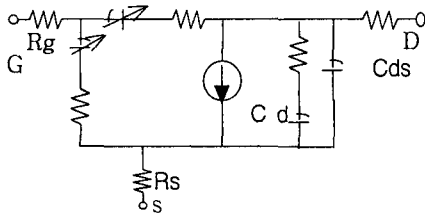


그림 1. P-HEMT의 비선형등가회로
Fig.1. P-HEMT Nonlinear equivalent circuit

III. 저 위상잡음 마이크로파 발전기의 설계

능동소자의 비선형 동작 특성은 바이어스 전압에 따라서 비선형 동작 특성을 가지는 파라미터를 이용하여 발전기의 위상잡음 변화를 분석할 수 있으므로 위상잡음은 능동소자의 비선형 모델링에 의한 DC/AC 파라미터 분석 과정을 각각의 동작점에 대해서 분석하여야 하며 각각의 동작 바이어스에 대한 최적의 비선형소자를 이용하여 발전기를 설계하고 비선형 소자변화에 대한 위상잡음의 변화를 분석함으로써 위상잡음과 비선형소자의 영향과 위상잡음감소에 대한 분석과정을 할 수 있다. 저 위상잡음 특성을 갖는 마이크로파 발전기는 바크하우젠 발진 조건을 만족하고 부하 단에서 낮은 위상잡음을 가지도록 구성하기 위하여 발전기의 귀환회로를 고려해야 하며 귀환회로에서 능동소자의 등가소자 Cgs와 Cgd, Cds 성분의 값이 클수록 귀환효율이 좋으므로 비선형 모델링에 따라 이들 소자와 위상잡음관계를 분석하여야 한다. 능동소자의 특성에 의하여 Cgs이 Cgd보다 크기 때문에 소스접지(common source)를 사용한다. 비선형 모델링 된 소자를 사용하여 발전기를 설계할 때 주파수의 자동튜닝을 고려하여 바랙터 다이오드에 의한 전압제어형 유전체 발진기(Voltage Tuned dielectric resonant oscillator) 형태를 고려할 수 있다.

우수한 위상잡음 특성을 가지는 유전체공진기는 높은 Q 계수와 온도에 대한 안정성이 높으며 특히 높은 주파수 대역에서는 낮은 위상잡음을 가지므로 고안정 발진회로에서 많이 사용된다.

DR을 이용한 마이크로파 발진기 설계에서는 DR의 등가 모델 분석에 의한 DR 공진기를 구성해야 하며 바이어스에 따라 변하는 비선형 커패시턴스와 위상잡음의 관계를 분석함으로써 최적의 저 위상잡음을 나타내는 조건과 산란계수를 결정할 수 있으며 산란계수에 의하여 발진기 조건을 만족시키고 최대 출력 신호전압에 대한 바이어스 점과 부하단 매칭조건에 대해서 고려하여 설계된다.

마이크로파 발진기는 DC전력을 RF전력으로 변화시키는 에너지 변환 장치로서 주파수 안정성과 효율이 높고 주파수 튜닝을 고려하여 유전체 공진기를 사용하여 발전기를 설계하였다. 유전체 공진기와 마이크로 스트립선로가 결합된 등가회로 파라미터 값

을 구한 후 출력 정합회로를 구성하여 설계된다. Bipolar나 FET는 부성저항을 이끌어내기 위해 귀환 구조를 필요로 한다. 귀환 회로는 불안정 조건을 만족하도록 선택하여 스미스도표에서 불안정 영역을 크게 하고 안정도 계수 K를 1보다 적게 만들어야 한다. 안정도 계수 K는 다음과 같이 표현된다[11].

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \quad (10)$$

$$(\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21})$$

그림 2의 마이크로파 발진기 회로에서 귀환회로를 조절하여 부성저항 Rfet를 최대로 하기 위하여 P-HEMT의 소스단에 개방 스텝(open stub)을 추가함으로써 얻을 수 있었고, 유전체공진기와 전송선로 사이의 공진회로를 해석하여 공진부를 설계하였다. Γ_r 과 $Z_{o/p}$ 는 입출력 포트에서 부성저항을 얻기 위해 스미스 도표 상에서 불안정 영역에 놓여야 하고 다음 식과 같은 발진조건을 만족하여야 하며 부하단은 식(12)에 적합하게 설계해야 한다[12].

$$|\Gamma_r| > \frac{1}{|\Gamma_{IN}|}, \quad \arg(\Gamma_r) = \arg\left(-\frac{1}{\Gamma_{IN}}\right) \quad (11)$$

$$R_{o/p} + jX_{o/p} = -\frac{R_{fet}}{3} - jX_{fet} \quad (12)$$

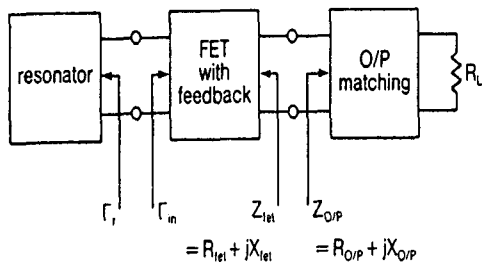


그림 2. 2포트 발진기 구조
Fig. 2. Two-port oscillator structure

IV. 전치분주 위상동기발진기의 위상잡음 분석

유전체공진기에 의한 마이크로파 발진기의 자유발진신호를 안정화시키고 온도 및 주변조건에 따라 발진주파수를 고정시키기 위하여 마이크로파 발진기에 위상동기회로(phase locked loop)를 적용하여 위상동기 마이크로파 발진기를 설계한다. 위상동기마이크로파 발진기는 기준신호를 발생하는 기준발진기와 마이크로파 발진기에 의한 신호를 전치분주시키고 기준신호의 위상을 비교하는 위상검출기 및 위상검출된 신호를 전압제어가 가능하도록 루프필터(loop filter)로서 구성되며 위상검출 방법에 따라 출력신호를 전치분주하여 사용하는 전치분주기형태는 그림 3과 같이 위상동기발진기의 구성에 따른 위상잡음을 모델링 할 수 있으며 위상동기발진기의 전달함수 관계를 고려하여 위상동기발진기의 출력 위상잡음은 다음 식과 같다[13].

$$L(\phi_{no}) = \left[\frac{L_{\theta}(f)_{nR}}{M} + L_{\theta}(f)_{nM} - L_{\theta}(f)_{nN} \right] \cdot \left[\frac{K_{PD}K_{DRO}H(s)}{1 + \frac{K_{PD}K_{DRO}H(s)}{Ns}} \right] + [V_{nPD} + V_{nLFF}] \cdot \left[\frac{H(s)K_{DRO}}{1 + \frac{K_{PD}K_{DRO}H(s)}{Ns}} \right] + L_{\theta}(f)_{nDRO} \frac{1}{1 + \left[\frac{K_{PD}K_{DRO}H(s)}{Ns} \right]} \quad (13)$$

위 식에서 K_{PD} 는 위상검파기의 전달함수, K_{DRO} 는 DRO의 전달함수, $H(s)$ 는 루프필터의 전달함수, N 은 분주비를 나타내며 $L_{\theta}(f)_{nR}$ 는 TCXO의 출력 위상잡음, $L_{\theta}(f)_{nM}$ 는 기준주파수 분배기의 위상잡음, $L_{\theta}(f)_{nDRO}$ 는 DRO 출력 위상잡음을 나타낸다. V_{nPD} 는 위상검출기 출력 위상잡음, V_{nLFF} 는 루프필터 출력위상잡음, $L_{\theta}(f)_{re}$ 는 TCXO의 출력 위상잡음을 각각 나타내며 θ_i 는 입력신호위상, θ_o 는 출력신호위상이며 θ'_{no} 는 귀환되는 출력신호(잡음)위상을 나타낸다.

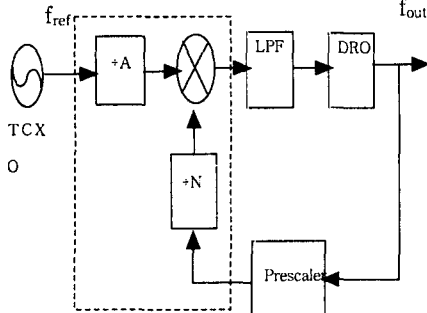


그림 3. Prescaler형 PL-DRO
Fig. 3. Prescaler type PL-DRO

V. Prescale PL-DRO의 특성측정 및 분석

전치분주PL-DRO의 설계 및 위상잡음 분석 저위상잡음 마이크로파 발진기를 설계하기 위하여 이용한 능동소자는 저잡음을 나타내는 p-HEMT NE32584c를 선정하였으며 비선형 등가소자를 분석하기 위하여 NEC에서 제공하는 데이터를 적용하여 Table-based기법을 적용하였다[14]. 본 논문에서 설정한 비선형 등가소자는 Cgs와 Cgd를 중심으로 위상잡음과의 관계를 분석하기 위하여 TOM 모델을 적용하고 Agilent사의 ADS[15]에 의하여 하모닉 바란스법으로 최적화시켰다. 그림 4는 바이어스에 따른 캐패시턴스값의 변화는 Vgs와 Vds 변화에 대한 Cgs, Cgd 변화 및 설계된 발진기의 위상잡음의 관계에 대하여 모의실험한 결과를 보여 주고 있다. 모의실험과정을 통하여 여러 바이어스점중 본 연구에서는 발진기를 설계하기 위하여 Vds=2V, Vgs=-0.6V, Ids=10mA를 중심으로 최적 바이어스점을 선정하였다.

한편 전치분주 위상동기 마이크로파 발진기의 설계하고 최적 바이어스를 중심으로 자유 발진된 마이크로파신호를 안정화시키기 위하여 본 연구에서는 전치분주기를 사용하여 위상동기 마이크로파 발진기를 설계하였다. 설계에 의하여 사용한 마이크로스트립선로는 $\epsilon_r=2.5$, $t=0.508$, $H=0.018\text{mm}$ 인 테프론 기판을 사용하였으며 제작된 마이크로파 발진기에서 안정된 발진특성을 얻기 위하여 주파수 동조범위 내에서 DRO의 발진주파수를 얻어내기 위해 튜닝 스쿼

류를 이용한 기계적 동조방법으로 정확한 13.25GHz의 출력주파수를 동조시켰으며 바랙터 다이오드에 의한 전압튜닝으로 위상동기(PLL)를 이용한 전기적 동조방법을 이용하였다.

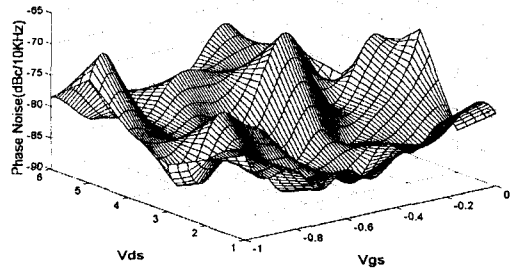


그림 4. 최적바이어스와 캐패시턴스 관계
Fig. 4. Optimum bias and Capacitances

DRO에 의해 발생된 발진주파수의 안정도를 높이기 위하여 모토롤라(Motorolar)의 PLL IC와 ATMEL의 Flash memory를 이용하여 루프를 구성하였으며 전치분주기는 14GHz에서 동작하는 NEC소자를 사용하여 8분주된 후 PLL IC로 입력되고, Flash memory에 의해 PLL IC 내부의 programmable divider를 제어하여 1.25MHz로 분주시켰다. 기준주파수 10MHz는 Flash memory에 의해 8분주 되어 1.25MHz로 위상검출기에 인가시켰다. PLL IC의 최적 위상잡음 특성을 갖도록 루프 대역폭을 고려하여 루프필터를 설계하였다. 그림 5는 제작한 전치분주 위상동기 마이크로파 발진기(Phase locked microwave oscillator)를 보여주고 있다.

발진주파수를 측정하기 위하여 스펙트럼 분석기인 HP 8565E를 사용하였으며 그림6은 제작된 발진기의 SPAN을 1MHz로 하였을 때의 스펙트럼이며, 그림 7은 발진기의 위상잡음을 보여주고 있다. 측정결과 출력전력은 10dBm이 나왔으며 위상잡음은 발진 주파수에서 -82 dBc/Hz @10KHz의 특성을 나타내고 있다. 그림 8는 식(13)에 대하여 설계한 고안정 저위상 잡음 특성을 나타내는 전치분주형 마이크로파 발진기에 대하여 조건을 대입하고 모의실험한 결과로서 -84dBc/Hz@10KHz의 위상잡음 특성을 보여주고 있으며 그림 9는 Varactor에 의한 튜닝범위를 나타내고 있으며 0.2MHz/V의 결과를 얻을 수 있었다.

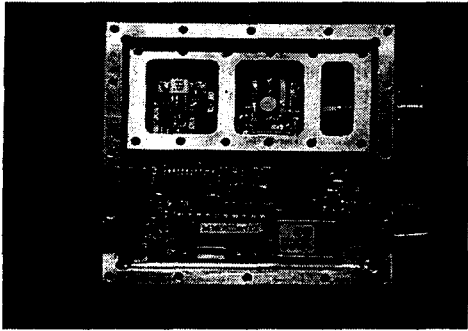


그림 5. 제작된 PL-DRO의 사진
Fig. 5. Photograph of assembled PL-DRO

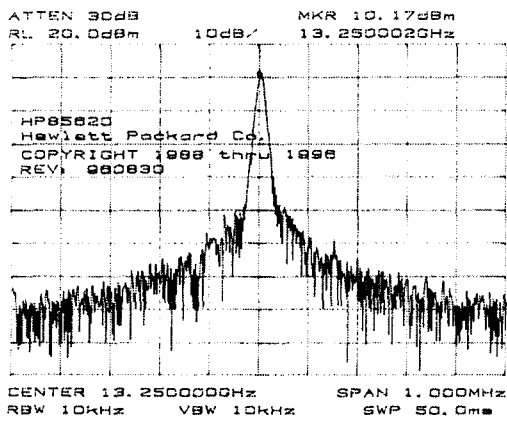


그림 6. 측정된 출력주파수
Fig. 6. Output frequency of designed PL-DRO

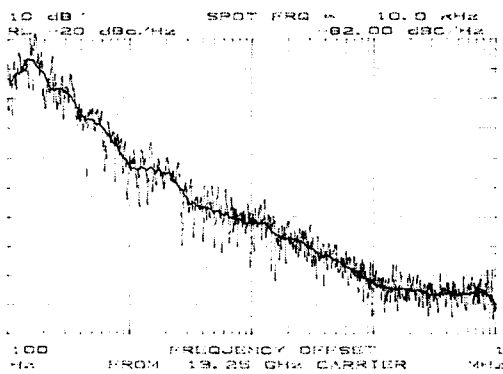


그림 7. 측정된 위상잡음 특성
Fig. 7. Measured phase noise of designed PL-DRO

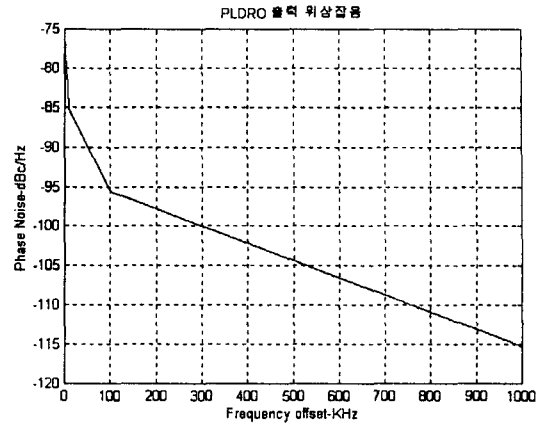


그림 8. 모의실험한 위상잡음
Fig. 8. Simulated phase noise

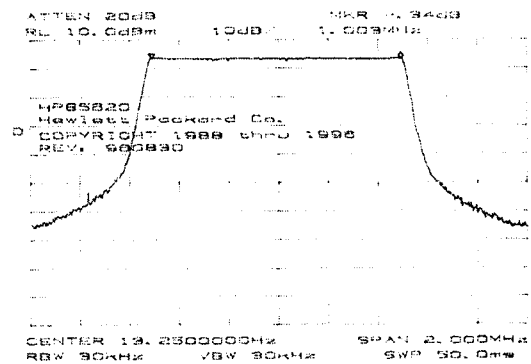


그림 9. 바랙터다이오드의 튜닝범위
Fig. 9. Truning range of Varactor diode

VI. 결론

고도화된 통신시스템이 많은 정보량을 처리하기 위해 Ka-대역과 같은 준 밀리미터파를 이용한 광대역 무선시스템으로 발전함에 따라 디지털 마이크로파 통신의 수신시스템에서 디지털 변조신호에 따른 코헤어런트신호는 국부발진기의 위상잡음은 수신감도에 직접적으로 영향을 미치므로 마이크로파 수신시스템에서 주로 이용하고 있는 헤테로다인형 국부발진기는 고안정 특성과 저 위상잡음특성을 동시에 나타내는 국부발진기를 필요로 한다. 본 연구에서는

저 위상잡음의 발전기를 설계하기 위하여 발전기의 능동소자(pHEMT)의 비선형 등가소자에서 위상잡음에 영향을 주는 비선형캐패시턴스를 분석하고 등가모델링에 의한 저 위상잡음 마이크로파 발전기를 설계하였으며 발전기의 고안정 특성을 위하여 분주기(prescaler)를 적용시켜 마이크로파 위상동기발전기를 설계하였다.

실험한 결과 고안정 저위상잡음을 나타내는 전치분주 위상동기발전기의 위상잡음은 $-82\text{dBc/Hz}@10\text{KHz}$ 로 이론값 $-84\text{dBc/Hz}@10\text{KHz}$ 에 근접한 값을 보였으며 발전기의 출력전력은 10.17dBm 을 나타내어 만족할 만한 결과를 보여주었다. 앞으로 본 연구에서 주장하는 비선형 등가소자와 위상잡음관계를 고려하여 발전기의 능동소자 택에 따라 위상잡음과 출력력을 예측할 수 있으며 향후 위상잡음을 보다 작게 하는 방안과 출력크기와 위상잡음관계를 절충하는 연구가 계속 진행되어야 한다. 본 연구에서 설계 제작된 고안정 국부발전기는 B-WLL/LMDS 등 광대역 적용하기 위하여 주파수 체배기와 대역통과 필터를 함께 설계함으로써 고안정 저위상잡음의 국부발전기로서 응용될 수 있다.

참고문헌

- [1] J.M. Dieudonne, B. Adelseck, "Advanced MMIC Components for Ka-band Communications System. a Survey." IEEE International Microwave Symposium. 1995. pp 11-14.
- [2] R.B. Perlow, "Microwave Video Distribution: 28-and 42-GHz." IEEE International Conference on Communication 1996. pp 1236-1240.
- [3] D.L. Ingram, L. Sjogren, et.al," A Highly Integrated Multi-Functional Chip set For Low Cost Ka-band Transceiver." IEEE International Microwave Symposium. 1998. pp. 301-304.
- [4] M. Schilpp, W. Sauer-Greff, "Influence of Oscillator Phase Noise and Clipping on OFDM for Terrestrial Broadcasting of Digital HDTV" IEEE. International Conference on Communication 1995. pp. 618-622.
- [5] Kolber M., " Predict Phase Noise effects in digital Communication systems." Microwave & RF V.38.No.9, Sep. 1999. pp. 59-62.
- [6] J. Christophe, et al., " Low Phase Noise Operation of Microwave Oscillator Circuits." IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, V.47. No.3 March 2000. pp. 411-420.
- [7] U. Rohde, Microwave and Wireless Synthesizers, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [8] U. Rhode and F. Hangemeyer, " Feedback Technique Improves Oscillator Phase Noise," Microwave & RF Nov. 1998. pp. 61-70.
- [9] Rizzili, Mastri, and Cecchetti, "Computer Aided Noise Analysis of MESFET and HEMT Mixers," IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, V.37, No.9, Sep. 1989.
- [10] Alain Cappy, "Noise Modeling Measurement Techniques," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.36, No.1, Jan. 1988.
- [11] TRi T. Ha, Solid-State Microwave Amplifiers Design, A Wiley-interscience John Wiley & Son Inc. 1981.
- [12] Phillip G Willson and Richard D Carver "An Easy -to-use FET DRO Design Procedure Suited to Most CAD Programs." IEEE MTT-s Digest, pp. 1033-1036, 1989.
- [13] Avi Brillant "Understanding Phase-Locked DRO Design Aspects", Microwaves Journal pp. 22-42. Sept. 1999.
- [14] Ce-Jun Wei, Y.A Tkachenko, " Table Based Dynamic FET Model Assembled From Small-Signal Models," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.47, No.6, June. 1999. pp. 700-705.
- [15] Agilent, Advanced Microwave Development System, Version 2001.

저자소개

민상보(Min Sang-Bo)

한양대학교 전자공학과 학사졸업
경남대학교 전자공학과 석사졸업
경남대학교 전자공학과 박사과정 수료
현재 (주) 마이크로라인 연구소장
※ 관심분야: 능동소자 모듈 설계

이영철(Rhee Young-Chul)

현재 경남대학교 정보통신공학부 교수