
서브하모닉 주입동기에 의한 밀리미터파 대역 고조파 발진기의 고성능화

최영규* · 남병근*

High-Performance Millimeter Wave Harmonic Output Oscillator using Sub-Harmonic Wave Injection-Synchronization

Young-kyu Choi* · Byeong-gun Nam*

요 약

서브하모닉 주입동기에 의한 밀리미터파 대역 고조파원의 고성능화에 대하여 다루었다. MES-FET로 8.7GHz의 발진기를 구성하고 서브하모닉파의 주입동기 방식으로 구동하여 17.4GHz의 고조파를 발생시켰다. 이러한 시스템에서 발진기는 발진과 동시에 체배기의 기능을 수행하여 안정된 고조파 발생시킬 수 있다. 이기술을 채택하면 자려발진주파수가 비교적 낮은 발진기로도 고안정, 고효율 고조파를 발생시키는 고조파출력발진기를 실현할 수 있다. 실험의 결과, 주입동기의 범위 26MHz 내에서 고효율 고조파가 관측되었으며, 서브하모닉파 주입전력에 비례하였다. 스펙트럼 분석기로 고조파 출력의 파형을 관측한 결과, 제2고조파 출력의 위상 안정성이 현저히 향상되었음이 확인되었다.

ABSTRACT

This paper deals with a millimeter wave source which is utilizing sub-harmonic injection-synchronization technique. A 8.7GHz oscillator with MES-FET is fabricated, and is driven as a harmonic output oscillator at 17.4GHz by means of sub-harmonic injection-synchronization. The oscillator operates as a multiplier as well as oscillator in this system. Adopting this technique, we can obtain a high stable, high frequency millimeter wave source even though self-oscillating frequency of an oscillator is relatively low. In the experiments, the range of injection-synchronization is about 26MHz and is proportional to the input sub-harmonic power. From the spectrum analysis of the 2nd harmonic output, we know that the phase noise of the harmonic oscillator is remarkably decreased.

키워드

Harmonic oscillator, millimeter wave source, active oscillator, sub-harmonic injection

I. 서 론

최근 이용 가능한 마이크로파대 주파수의 고갈, 고속 무선 LAN이나 다중영상전송 등의 활용에 필요한 광대역을 확보하기 위해 밀리미터파 이상의 주파수를 이용

하고 싶은 욕구가 증가되고 있다. 일반적으로 밀리미터파대의 고체발진기는 주파수가 높기 때문에 회로 자체의 내부손실이 크고, 소형의 능동소자로는 높은 출력을 얻는데 한계가 있으며, 발진의 안정도 또한 매우 낮은 편이다. 이를 개선하기 위한 방법으로 어느 정도 낮은 주파

수에서 발전시키고, 그 출력을 체배시키는 고조파출력 발진기가 제안되어 연구가 진행되고 있다[1-2]. 그러나 별도로 체배기를 이용하는 방식은 회로가 커지고 시스템이 복잡해지는 단점을 지니고 있다[3].

본 논문에서는 체배기를 사용하지 않고 발진기 자체에 체배의 기능을 부여하여 발진주파수의 안정도를 높이면서도 출력을 향상시킬 수 있는 주입동기 고조파발진기에 대하여 실험적 고찰을 하였다[4-6]. 주입동기를 취하는 발진방식은 주입신호의 주파수와 발진주파수가 같은 경우는 물론이고, 발진주파수의 정수분의 1배의 주파수를 이용하는 서브하모닉(Sub-harmonic) 파의 주입동기도 가능하다[7-9]. 안정도가 높은 신호원을 이용하여 주입동기를 취하면 발진주파수의 안정도를 주입신호원의 안정도와 동일한 수준까지 향상시킬 수 있다. 특히 주파수가 낮을수록 안정도가 높은 신호원의 확보가 용이하므로, 이는 고주파 발진기 실현에 매우 유용한 방식이다.

본 논문에서는 MES-FET를 발진소자로 이용하여 자려발진주파수가 8.7GHz인 직렬귀환형발진기를 제작하고, 서브하모닉파 주입동기에 의한 고조파발진 실험을 실시하였다. 먼저, 수치계산에 의해 설계한 발진기에 대하여 중심주파수 17.4GHz 부근에서 제2고조파 출력이 최대가 되도록 회로값을 산출하여 발진기를 제작하고 자려발진 특성을 측정하였다. 제작된 발진기의 서브하모닉파 주입동기 특성을 평가하기 위해 8.7GHz의 1/2, 1/3 배의 서브하모닉파를 외부 발진신호로 인가하고, 17.4GHz 부근의 제2고조파 출력의 주파수 안정성 및 출력의 크기를 측정하였다. 이어서 출력스펙트럼을 측정하여 서브하모닉파의 주입에 의해 발생한 제2고조파가 자려발진에 의한 고조파보다 위상잡음이 향상되는 것을 확인하고, 주입신호의 동기범위도 제시하였다.

II. 고조파 출력 발진기

2.1 발진기의 설계 및 제작

2.1.1 능동소자(FET)의 특성

소자의 비선형적 특성은 바이어스 전압에 따라 변하므로 먼저 발진기의 제작에 사용한 FET의 특성을 측정하였다. 그림 1처럼 FET(NEC제 NEC76084)의 게이트 및 드레인단자에 50Ω의 선로를 접속하여 구성된 FET에

특정 주파수의 입력파를 인가하고 소자의 비선형성에 의해 발생한 고조파 성분의 크기를 측정하였다. 입력파는 게이트단자에 입력하는 경우와 드레인단자에 입력하는 2가지 방법이 있으나, 여기서는 게이트단자에 입력한 결과를 그림 2에 보였다. 입력파의 주파수와 전력의 크기는 6GHz, 1mW와 8.7GHz, 5mW의 2가지로 나누어 사용하였다. 6GHz는 24GHz의 제4고조파 발진기, 8.7GHz는 17.4GHz의 제2고조파 발진기의 기본 주파수로 각각 선택하였다. 그림 2에서 소자의 비선형성이 v_{gs} 의 값에 의존하는 것을 알 수 있다. $v_{gs} = 0V$ 의 부근에서는 선형성이 강하므로 고조파 성분의 발생이 거의 없으며, $v_{gs} = -1V$ 부근에서 제2고조파 성분의 크기가 가장 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 사용된 FET는 $v_{gs} = -1V$ 부근에서 소자의 비선형성이 가장 커진다는 것을 알 수 있다.

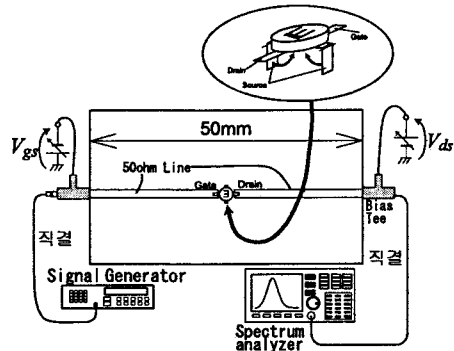


그림 1. FET의 비선형성에 의한 고조파 출력 측정계
Fig. 1 Experimental set-up for measuring of the non-linearity of the FET

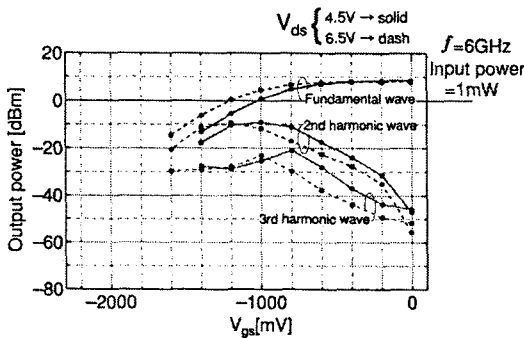
2.1.2 발진기의 설계

발진기의 제작에는 표 1의 능동소자와 유전체 기판을 사용하였다. Ansoft사의 시뮬레이터 Serenade를 이용하여 회로값, 즉, 게이트선로의 길이 l_g , 소스선로의 길이 l_s , 드레인 개방 스테르브까지의 길이 l_d 를 산출하였다. 고조파출력 발진기는 그림 3에 보인 것처럼 직렬귀환형 구조를 채택하였다. 발진된 출력은 FET의 드레인에서 제2고조파 성분만 나오도록 출력선로에 제2고조파를 통과시키는 필터를 삽입하였다. 고출력 제2고조파를 얻기 위해서는 기본파 주파수 f_o 에서 부하임피던스 Z_L 의 값이

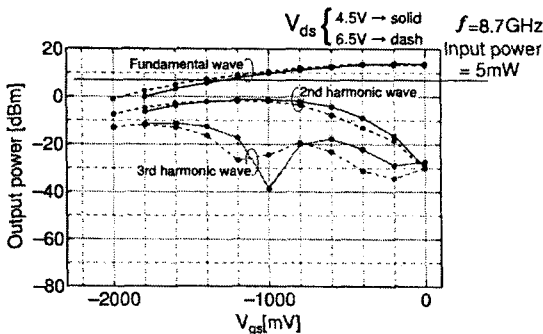
실수부는 0이 되고, 허수부는 적절한 값을 선택할 필요가 있다[10].

표 1. 사용소자 및 기판의 사양
Table.1 Characteristics of the FET and Substrate

소자	형번	NEC제 MES-FET(NE76084)
소자	게이트장	0.3 μm
	게이트폭	280 μm
	상호컨덕턴스	40 mS
기판	비유전율	2.33
	유전체 두께	0.508mm



(a) 6GHz, 1mW



(b) 8.7GHz, 5mW

그림 2. 게이트 입력시 FET의 바이어스전압 의존성
Fig. 2 FET characteristics for the gate input type

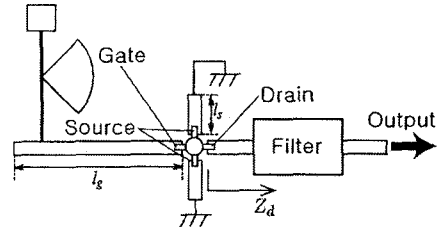


그림 3. 고조파 발생 직렬귀환형 발진기의 개형
Fig. 3 Serial feedback oscillator for generation of the harmonic wave components

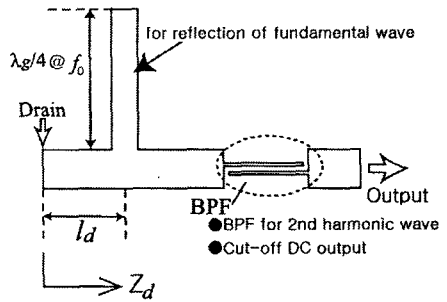


그림 4. 필터의 회로 구성

Fig. 4 Circuit of the filter for the output terminal

따라서 필요한 부하임피던스 값을 얻기 위해 그림 4와 같이 필터를 설계하였다. 그리고 드레인단자에서 l_d 만큼 떨어진 위치에 기본파의 1/4 파장 개방스터브를 삽입하였다. l_d 의 길이에 따라 발진기로 되돌아오는 기본파의 위상이 변화하므로, 드레인단자에서 본 부하임피던스의 허수부의 값은 l_d 의 값에 의해 임의로 설정할 수 있다. 이렇게 결정하면 제2고조파에서 스텐브의 길이는 약 반파장이 되므로 스텐브의 영향은 거의 없게 된다. 그러나 스텐브 만으로는 기본파를 완전히 차단할 수 없으므로 제2고조파를 통과 주파수대로 하는 BPF를 삽입하면 기본파 주파수에서 Z_d 의 실수부를 0에 근접시킬 수 있다.

다음으로 필터를 부착한 후 l_d 를 변화시키면서 발진특성을 해석하여 제2고조파의 출력이 최대가 되는 부하를 구하였다. 단, 부하임피던스가 변하면 발진 주파수가 변하므로 필요로 하는 발진주파수가 되도록 길이를 변화시킬 필요가 있다. 수치계산의 결과, $l_g = 21.4\text{mm}$, $l_s = 4.5\text{mm}$, $l_d = 1.5\text{mm}$ 일 때 표 2와 같은 특성의 가장 큰 제2고조파 출력이 산출되었으며, 이때의 부하임피던스 Z_d 의 값은 그림 5와 같이 결정되었다.

표 2. 필터 접속 후 발진기의 출력 특성
Table 2. Simulated output characteristics of the oscillator with connection of filter

발진주파수	8.709 GHz
기본파 성분 출력	-33 dBm
제2고조파 성분 출력	6.52 dBm

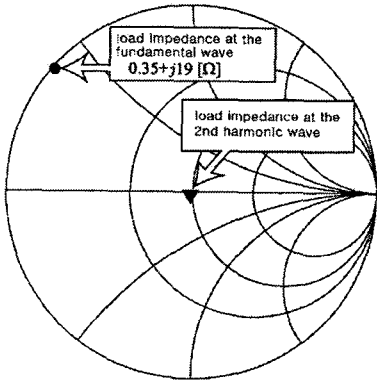


그림 5. 최대 제2고조파 출력의 부하임피던스
Fig. 5 Load impedance for the largest second harmonic

2.2 발진기의 특성

실험에 사용한 발진기의 개형을 그림 6에 보였다. 게이트의 바이어스전압 공급 선로는 선로의 개방단에서 제2고조파 주파수의 1/4 파장 떨어진 위치에 접속하고, 기본파에 대한 부채형 초크를 접속하여 기본파 및 제2고조파의 영향을 차단하였다. 드레인의 바이어스전압 공급 선로는 기본파 반사용 개방스터브와 제2고조파에 대한 부채형 초크를 삽입하였다.

그러나 제작된 발진기가 약 10GHz 정도의 약간 높은 주파수에서 발진하였다. 따라서 부하임피던스의 리액턴스값을 쇼트 근방까지 작은 값으로 낮추고 게이트선로의 길이를 19mm로 조절하였을 때 8.7GHz 부근에서 발진하였다. 제작된 발진기의 바이어스 전압특성을 측정 한 결과를 그림 7에 보였다. 약 10dBm의 제2고조파의 출력으로 시뮬레이션의 결과보다 약간 큰 값이 관측되었다. 기본파의 출력은 제2고조파에 비하여 30dB 이하로 억제되어 양호한 고조파 출력 발진특성을 보였다.

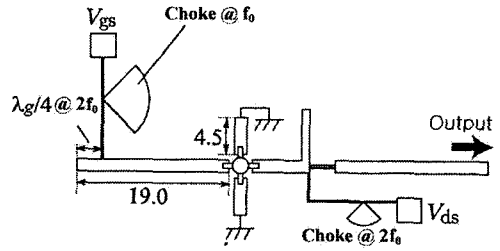
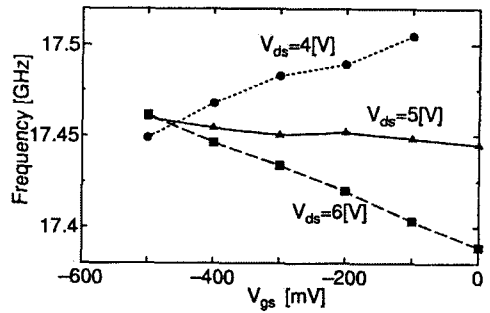
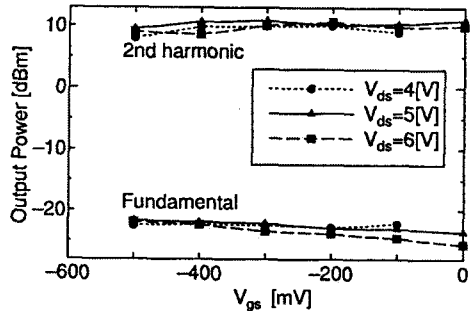


그림 6. 제2고조파 출력 발진기(단위: mm)
Fig. 6 Second harmonic oscillator (scale : mm)



(a) 발진주파수



(b) 출력전력

그림 7. 발진기 출력의 바이어스 의존성
Fig. 7 Bias Voltage characteristics of oscillator

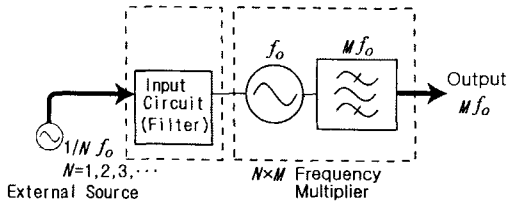


그림 8. 고조파 주입동기 발진기의 개념도
Fig. 8 Block diagram of harmonic injection oscillator

III. 주입동기 발진실험

3.1 실험계의 구성

고조파 주입동기 발진기의 개념도를 그림 8에 보았다. 발진기는 서브하모닉과 주입신호에 대하여 $N \times M$ 배의 체배기 역할을 하게 된다. 주입동기 발진 실험계를 그림 9에 보였다. 서로 다른 서브하모닉파의 동기신호를 주입하기 위한 회로는 주입신호의 주파수에 따라 각각 따로 제작하였다. 주입 신호원으로 Agilent Technology사의 83711B를 사용하였다. 발진기에서 누설된 전력이 신호원에 유입되는 것을 막기 위해 서브하모닉파를 주입할 때는 감쇄기를, 기본파를 주입할 때는 아이솔레이터를 이용하였다. 먼저, 서브하모닉과 주입동기를 실시하기 전에 외부신호를 주입하지 않은 상태에서 자려발진 특성을 측정하였다. 자려발진 특성은 앞 절의 결과와 일치하는 결과가 관측되어 각각 따로 제작한 주입회로가 발진기의 특성에 미치는 영향은 거의 없다는 것을 알 수 있다.

표 3. 주입동기 실험결과
Table 3. Characteristics of the injection-synchronization

서브하모닉 차수	1	2	3
V_{as} [V]	4.64	5.50	4.85
V_{gs} [V]	0.00	-0.01	0.00
제2고조파주파수[GHz]	17.339	17.490	17.374
출력전력[mW]	9.1	11.8	9.1
누설전력[mW]	0.13	0.025	0.006

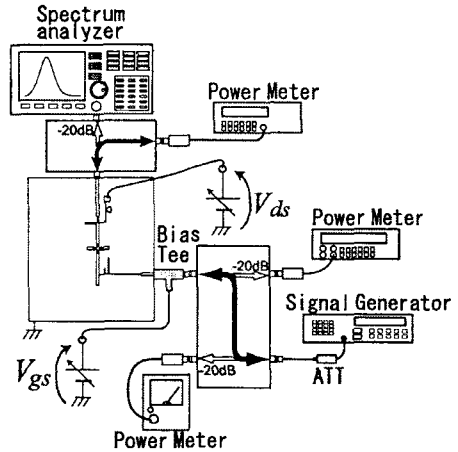
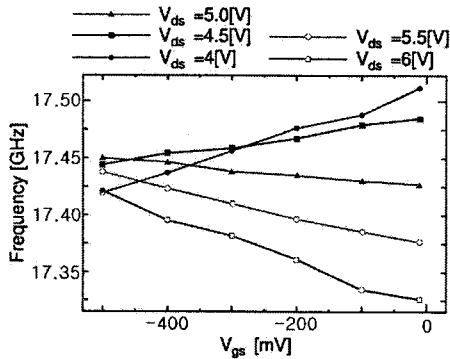


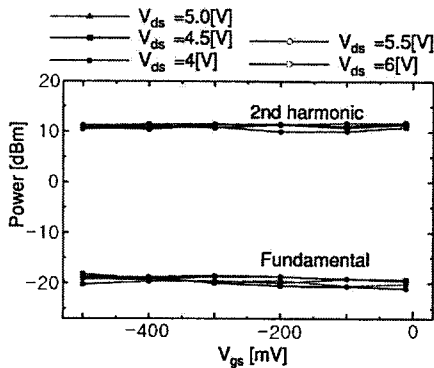
그림 9. 주입동기 발진 실험계
Fig. 9 Experimental set-up of the sub-harmonic injection-synchronization

3.2 서브하모닉과 주입동기 특성

1/2 서브하모닉과 주입동기 발진실험의 측정결과를 그림 10에 보였다. 1/2 서브하모닉 4.35GHz 주입신호에 대하여 자려발진 주파수의 2배인 17.4GHz를 중심으로 기본파보다 약 30dB 이상 큰 제2고조파가 관측되었다. 기본파, 1/2, 1/3 서브하모닉과 주입동기 실험에서 측정된 발진주파수 및 출력의 특성은 표3과 같다. 서브하모닉파를 인가한 주입동기의 발진출력이 기본파의 경우와 거의 동일한 특성을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 그림 11에는 자려발진, 1/2 서브하모닉파에 의해 동기된 제2고조파 출력의 스펙트럼을 보였다. 자려발진상태에서는 100KHz의 읍셋에서 위상잡음이 약 -70dBc/Hz 정도로 관측되었다. 입력의 크기 0.3mW, 3mW의 1/2 서브하모닉파의 인가에 의해 동기된 출력의 경우, 주입전력이 커질수록 발진스펙트럼이 예리해지며 잡음이 현저히 줄어들고 출력이 증가하는 것을 알 수 있다. 1/2 서브하모닉파에 의한 동기한계와 출력전력을 그림 12에 보였다. 동기주입전력을 일정하게 한 후 동기상태에서 주입신호 주파수를 변화시키면서 동기에서 이탈할 때의 주파수를 측정하였다. 기본파 주파수를 중심으로 상하 약 26MHz의 동기범위가 관측되었다. 그림 12 (b), (c)에서 출력은 주입전력이 커짐에 따라 감소하는 경향이 있으나, 그 감소량은 그림처럼 매우 작은 편이었다.



(a) 발진주파수



(b) 각 고조파성분의 출력전력

그림 10. 발진기 출력의 바이어스 의존성
Fig. 10 Bias voltage characteristics of oscillator

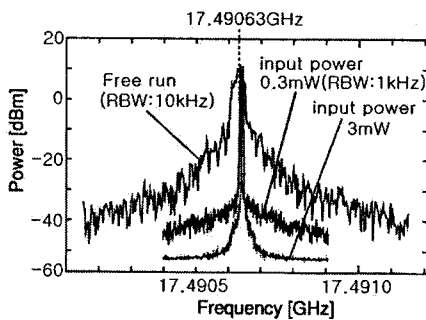


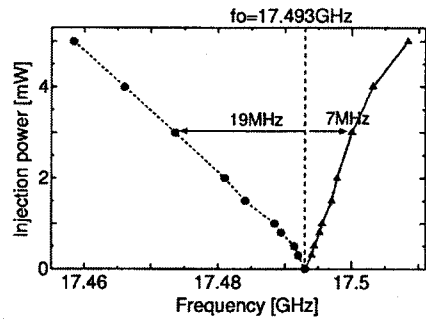
그림 11. 제2 고조파 출력 스펙트럼

Fig. 11 Spectrum of the 2nd harmonic components

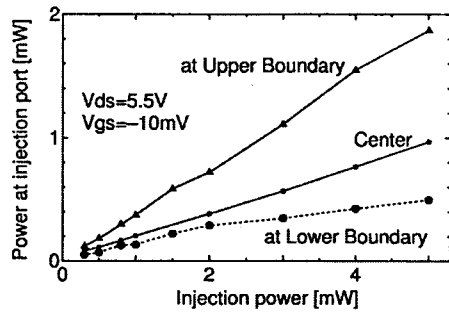
기본파 및 1/3서브 하모닉파에 의한 측정의 결과도 1/2 서브하모닉파의 경우와 일치하는 경향을 보였다. 주입하는 전력 중에서 되돌아오는 양은 제일 큰 경우에도 1/3 정도에 불과하였지만, 이것을 좀 더 줄일 수 있다면

동기범위의 확대가 가능하게 된다. 기본파 주입과 비교하면 서브하모닉과 주입에서는 동기범위가 좁고, 서브하모닉 차수가 커질수록 동기범위는 좁아지게 된다.

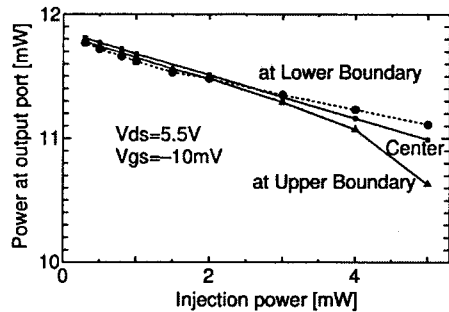
이것은 주입된 서브하모닉파가 체배되어(1/2의 경우는 2체배, 1/3의 경우는 3체배) 체배된 파로 동기되기 때문이다. 따라서 체배의 효율이 동기폭에 의존하는 것을 알 수 있다. 기본파 주입의 경우의 동기대역폭은 주입전력의 평방근에 비례하지만, 1/2서브하모닉 주입의 경우에는 거의 주입전력에 비례하고 있다.



(a) 동기한계



(b) 동기한계의 출력전력



(c) 주입포트 누설전력

그림 12. 주입동기 한계 내에서의 발진기 특성
Fig. 12 Characteristics of oscillator within limitation of injection-synchronization

IV. 실험결과와 고찰

4.1 위상잡음

자려발진 주파수의 $1/N$ 의 주파수에 가까운 서브하모닉파를 주입한 경우 그 주입신호의 N 차고조파에 의해 발진기는 주입신호에 동기한다. f_o 를 자려발진 주파수로 하는 발진기에 외부 발진원으로 f_o/N 주파수의 신호를 주입하고, M 차고조파 항을 출력으로 취하면 발진기는 $N \times M$ 배의 주파수 체배기와 동일한 기능을 하게 된다. 이 때 동기된 발진기 출력의 위상잡음은 이론적으로 다음과 같이 주어진다[11].

$$P_{noise,out} = (N \times M)^2 \times P_{noise,in} \quad (1)$$

여기서, $P_{noise,out}$ 는 발진기의 기본파 출력의 위상잡음전력, $P_{noise,in}$ 은 주입신호의 위상잡음전력이다. 식에서 보면 주입신호의 위상잡음전력에 의해 출력의 위상잡음이 결정된다. 그림 11에서 확인된 바와 같이 $1/2$ 서브하모닉파 주입동기의 스펙트럼을 관찰한 결과 위상잡음이 현저히 줄어든 것이 확인되었다. 따라서 자려발진 상태의 위상잡음이 크더라도 잡음이 작은 외부 주입신호원을 이용하여 동기를 취하면 출력파의 위상잡음을 낮출 수 있다는 것을 알 수 있다.

4.2 동기범위

그림 12에서 기본파 주입의 경우의 동기대역폭은 주입전력의 평방근에 비례하지만, $1/2$ 서브하모닉 주입의 경우에는 거의 주입전력에 비례하고 있음이 확인 되었다. 이 결과는 Adler의 식[4]

$$\Delta f = \frac{f_o}{2Q_{ex}} \frac{E^i}{E_o} \quad (2)$$

와 일치하는 결과이다. 여기서, f_o 는 자려발진주파수, E_i , E_o 는 각각 주입신호의 기본파 진폭, 자려발진기 기본파 진폭이다. Adler식에서 주입진폭에 주입신호의 N 차고조파 성분의 진폭이 대응한다. 예를 들어 $1/2$ 서브하모닉파 주입동기의 경우, 주입진폭에는 발진기 비선형성의 2차항에 의해 주입신호의 $1/2f_o$ 에서 발생하는 제2고조파의 주파수 f_o 성분이 대응한다. 발생된 N 차고조파

f_o 성분의 진폭은 N 차항에 의해 발생하였으므로 주입신호의 진폭의 N 승에 비례하는 관계이고, 또 주입전력의 $N/2$ 에 비례하는 관계가 된다. 결국 동기한계와 $1/N$ 서브하모닉 주입신호 전력과의 관계는 $N/2$ 에 비례하게 된다. 따라서 $1/2$ 서브하모닉 발진기의 경우, 주입전력과 동기범위와의 관계는 서로 비례하게 되는 것이다.

동기상태를 유지할 수 없는 주파수와 자려발진 주파수 f_o 와의 차 Δf 는 주입동기발진기의 실용화에 있어서 발진기의 자려발진주파수가 온도 등 외부환경이나 발진기의 성능 열화에 의해 변하기 때문에 이를 감안하여 충분히 확보하는 것이 필요하다.

V. 결 론

고안정, 고출력 밀리미터파대의 발진원을 실현하기 위하여 외부 발진원의 서브하모닉파에 의해 주입동기되는 고조파출력발진기를 설계, 제작하고, 이를 이용하여 서브하모닉파에 의한 주입동기 특성을 측정하였다. 발진기의 기본적인 구성은 직렬귀환형발진기이지만, 기본파 주파수 및 제2고조파 주파수에 대한 부하임피던스를 최적화함으로써 높은 출력의 제2고조파를 얻을 수 있도록 조절이 가능하였다. 시험 제작한 발진기는 8.7GHz의 자려발진 상태에서는 주파수 안정도도 낮았으며 위상잡음도 컸지만, 외부의 안정한 신호원에서 주입동기를 걸어줌으로써 오히려 주파수가 높은 17.4GHz의 제2고조파 출력에서는 주파수의 변동이 억제되고 위상잡음도 작아지는 것을 알 수 있었다.

기본파 및 $1/2$, $1/3$ 의 서브하모닉파를 주입한 경우의 동기대역폭을 측정된 결과, 서브하모닉의 차수가 작을수록 동기폭이 넓어지는 것을 알 수 있었다. 이번 연구에서는 정성적인 특성을 파악하기 위한 범위 내에서 실험을 진행하였으나, 이후에는 정량적인 측정결과를 얻을 수 있도록 실험의 정밀도를 높여서 실용화에 필요한 구체적인 데이터를 제시할 예정이다.

참고문헌

- [1] K. Solbach, "Simulation Study of Harmonic Oscillator", IEEE Trans. Microwave Theory Tech.,

vol. MTT-30, no. 8, pp. 1233-1237, Aug. 1982.

- [2] M. Sanagi, T. Tsukizawa, and S. Nogi, "Second Harmonic Beam Scanning of Active Antenna Array", 29th European Microwave Conf. Proc., vol.2, pp. 361-364, Munich. Oct. 1999.
- [3] A. Alexanian, H. C. Chang and R. York, "Enhanced Scanning Range in Coupled Oscillator Arrays Utilizing Frequency Multipliers", IEEE AP-S Symp. Dig., pp. 1308-1310, Newport Beach, CA, 1995.
- [4] R. Adler, "A study of Locking phenomena in oscillator", Proc. IRE, 34, pp. 351-357, 1946.
- [5] I. Schmeideg, "Harmonic Synchronization of Nonlinear Oscillators", Proc. IEEE, vol. 59, pp. 1250-1251, 1971.
- [6] R. A. York and T. Itoh, "Injection- and Phase-Locking Techniques for Beam Control", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 46, no. 46, no. 11, pp. 1920-1929, Nov. 1998.
- [7] A. S. Daryoush, T. Berceci, R. Saedi, P. R. Herczfeld, and A. Rosen, "Theory of Subharmonic Synchronization of Nonlinear Oscillators", IEEE MTT-S Dig., pp. 735-738. 1989.
- [8] X. Zhang, X. Zhou, B. Aliener, and A. S. Daryoush, "A Study of Subharmonic Injection Locking for Local Oscillators", IEEE Microwave and Guide Wave Letters, vol. 2, no.3, March, 1992.
- [9] X. Zhang, X. Zhou, and A. S. Daryoush, " A Theoretical and Experimental Study of the Noise Behavior of subharmonically Injection Locked Local Oscillators", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, no. 5, pp. 895-902, May 1992.
- [10] P. Liao, "A New Phase-Shifterless Beam-Scanning Techique Using Arrays of Coupled Oscillators", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 41, no. 10, pp. 1810-1815, Oct. 1993.
- [11] S. Kishimoto, M. Itho, K. Maruhashi, and K.Ohta, "Q-band Inject Synchronization Oscillator", Technical Report, MW2002-162, Japan. 2003.

저자소개

최 영 규(Young-Kyu Choi)



1981년 중앙대학교 공과대학
전자공학과 공학사
1988년 교토대학(일본)대학원
전자공학과 공학석사

1992년 동 대학원 공학박사
1992~1995 국립 후쿠이대학(일본) 전임강사
1998년~신라대학교 공과대학 전자공학과 교수
※관심 분야: 초고주파, MMIC, 안테나, 광센서

남 병 근(Byeong-Gun Nam)



1983년 인하대학교 공과대학
전자공학과 공학사
2003년 동아대학교 대학원 석사

2004년~현재 신라대학교 대학원 신기술시스템응용공학과
1997년~현재 대진정보통신고등학교 교사
※관심 분야: 전자파 해석, 고주파 발진기, 배열안테나,
RF를 이용한 디지털 통신, 원격계측