

VCO 표류성분 상쇄기와 빗살 하모닉 발생기를 이용한 주파수 대역 확장기의 구현

정회원 강 승 민*

Implementation of Frequency Bandwidth Expander using VCO Drift Canceller and Comb generator

Seung-min Kang* *Regular Member*

요 약

VCO의 표류성분 제거기와 빗살 하모닉 발생기를 이용하여 주파수를 상향 변환하면서 동시에 주파수 대역폭을 확장하는 시스템을 구현하였다. 출력 주파수 범위가 220~280MHz, 분해능이 5MHz인 저주파수 합성기의 출력을 1660~2140MHz의 광대역 주파수로 확장한다. 최종출력의 위상 잡음 상태는 저주파수 합성기와 빗살 하모닉 발생기에 의해 결정되며 VCO의 표류성분은 최종 출력에 나타나지 않는다. 필터 뱅크처럼 VCO의 조절로 주파수가 60MHz의 단위로 가변되는데 이때의 가변시간은 3usec이하이며, 스퓨리어스는 -55dBc이하이다. VCO의 출력 주파수 범위를 확장하면 쉽게 출력 대역폭을 추가로 확장할 수 있으며, 빠른 스위칭 시간을 요구하는 광대역 초고주파수 합성기에 응용될 수 있다.

ABSTRACT

We have implemented Frequency bandwidth expander with frequency upconverting by VCO drift canceller and comb generator. The output of the low frequency synthesizer which the output frequency is 220~280MHz(Resolution : 5MHz) is expanded to 1660~2140MHz by this system. The phase noise of this system only depends on the phase noise of comb generator and low frequency synthesizer. The phase noise of VCO don't influence at the frequency expander because the drift of VCO cancel out. When we control the output of VCO, the output frequency of this system is varied by 60MHz x N as filter banker. The switching time and the spurious of the frequency expander is below 3usec, -55dBc respectively. This system easily expands bandwidth additively by expanding the output bandwidth of the VCO. We can apply the frequency expander to very wide band microwave synthesizer which has fast switching time.

I. 서 론

주파수 합성기는 소수의 주파수 신호원을 이용하여 다수의 주파수 신호를 발생하는 장치이다. 넓은 주파수 대역폭을 가지는 광대역 주파수 합성기는 응용 분야에 따라 개발 방법이 다르겠지만 대체로 협대역의 저주파수 합성기의 출력을 고주파수로

상향변환하고, 동시에 대역폭을 확장한다. 이중에 주파수 대역을 확장하는 방법 역시 다양하다. 예를 들면, 하모닉발생기와 필터뱅크(Filter Banker)를 사용하는 직접확장법이 있다. 이는 여러개의 주파수원이 필요하고 주파수 대역폭 확장의 정도에 비례한 필터의 개수(if M), 이들을 선택하기 위한 초고주파수 스위치(M x 1)가 필요하기 때문에 하드

* 선린대학 정보통신과(sm kang@www.sunlin.ac.kr)
논문번호 : 99046-0204, 접수일자 : 1999년 2월 4일

웨이 매우 복잡해진다. 다른 방법으로 주파수 체배기를 사용할 수 있다. 이는 간단하게 낮은 주파수를 높은 주파수로 체배함과 동시에 대역폭을 확장할 수 있지만, 체배 후 위상 잡음이 $20\log N$ (N:체배수) 만큼 악화되고, 주파수 합성 분해능이 N배 증가되는 단점이 있다. 그리고 주파수 체배기의 입력단은 대체로 협대역의 특성을 가지고 있어 저주파수 합성기의 출력이 제한적이고, 체배기 출력단의 주파수 대역폭이 넓은 경우 이를 정합하는 문제가 있다. PLL을 이용하는 방법이 있지만 이는 스위칭 속도가 느려 고속의 주파수 합성기 제작에는 적용할 수 없고, 매우 높은 주파수 합성기는 소자(위상 검출기, 주파수 분주기)의 동작 속도의 한계로 단일 루프로 간단하게 제작할 수 없어 다단(다단 PLL을 이용해야 하는데, 이 경우 회로가 복잡해진다.^[1-2]

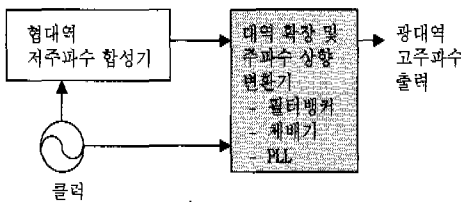


그림 1. 광대역의 초고주파수 합성기의 일반적인 구조[1]

이와같은 여러 문제점을 회피하면서 간단하게 주파수 대역폭을 확장하고, 동시에 주파수를 상향변환하는 방법이 필요하게 되었다. 따라서 본 논문에서는 VCO의 표류성분(Drift)을 제거하는 회로와 빗살하모닉(이하 Comb이라함) 발생기를 이용하여 주파수 대역폭 확장 및 상향변환기를 구현하였다. 표 1에 다양한 주파수 확장기의 특징을 비교하여 나타냈다.

표 1 다양한 주파수 확장기의 비교

	직접 확장법	주파수 체배법	다단 PLL	제안된방법
대역폭	넓 음	좁 음 (정합요)	넓 음	광대역 (확장성)
분해능	중 간	체배율 비례	낮 음 (수KHz)	높 음
스위칭시간	빠 림	빠 림	느 림	빠 림
위상잡음	좋 음	$20\log N$ 로 악화	좋 음	좋 음
비용 (회로)	고 가 (복 잡)	저 가 (간 단)	고 가 (복 잡)	저 가 (간 단)

II. 새로운 구조의 제안과 해석

2.1 새로운 주파수 확장기의 제안과 동작원리

그림 2는 제안한 주파수 대역폭 확장 및 상향 변환기의 구조이다. VCO 출력은 전력 분배기에서 둘로 나누어진다. 한쪽은 Mixer1로 전달되어 Comb 발생기 출력과 신호 혼합된다. 혼합된 이 신호는 여러 스퍼리어스 성분 ($f_{vn} \pm f_{hn}$, f_{vn} : VCO 출력 주파수, f_{hn} : Comb 발생기의 특정 차수 출력)을 포함하고 있다. VCO의 출력 주파수를 적절히 조절하면(f_{v1}) 하모닉 발생기의 여러 하모닉 신호중에 특정 차수 신호(f_{h1})에 의한 출력 신호($f_{v1} - f_{h1}$)만이 BPF #1을 통과한다. 이 신호는 협대역의 저주파수 합성기와 신호 혼합되어 필터를 거쳐 Mixer3로 전달된다. 이 신호는 VCO의 표류 성분을 아직 포함하고 있다. 이 신호는 Mixer3에서 VCO 출력과 신호 혼합되고, 여기서 VCO 성분은 거의 상쇄되어 없어진다.

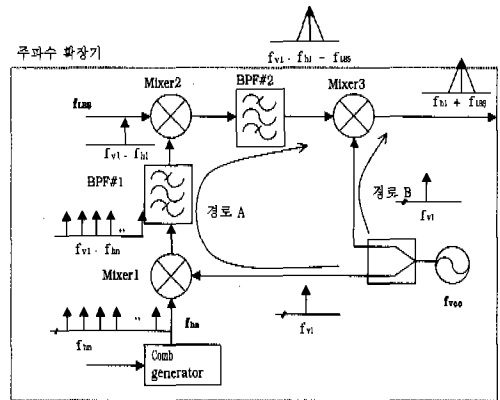


그림 2. 제안한 주파수 대역폭 확장기

그 결과 Mixer3의 출력 신호의 주파수는 협대역의 낮은 주파수 합성기의 출력 주파수와 VCO에 의해 선택된 comb 발생기의 주파수의 합($f_{LBS} + f_{hn}$)이 되고, VCO의 나쁜 잡음 특성은 두 번의 신호 혼합과정에서 상쇄되어 없어진다.

2.2 수학적 모델링을 통한 분석

본 논문에서 제안한 구조는 저주파수 협대역 주파수 합성기에 의하여 결정된 주파수 분해능을 유지하면서 comb 발생기, VCO 등을 이용하여 주파

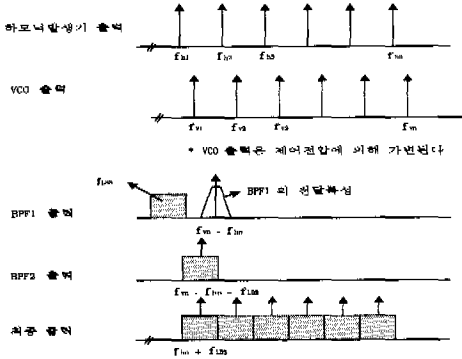


그림 3. 주파수확장기의 주파수 관계도

수를 상향변환하고 동시에 대역폭을 확장한다. 이때 VCO의 잡음 상태는 출력 신호에 영향을 미치지 않는다. 단지 comb 발생기의 특정차수를 선택하는데 도움을 줄뿐 자신은 최종단에서 없어진다. 그러나, 본 구조에서 알 수 있듯이 VCO의 출력은 전력 분배기에 의해 두 경로로 나누어지는데, 이 두 경로 사이의 신호 전달 시간지연 차가 필히 존재하고, 이 지연시간 차가 VCO의 표류 성분 상쇄 정도에 영향을 미친다.

두 경로간의 지연시간차로 인해 VCO의 표류가 출력 스펙트럼에 어느정도 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 본 논문은 협대역 주파수 변조이론을 적용한다. 그림 2에서 경로 A에 의한 신호의 시간지연을 T_A , 경로 B에 따른 신호의 시간지연을 T_B 라 하자. 협대역 주파수 변조이론에 의해 임의의 시간 t 에서의 순간 주파수 $f(t)$ 는 다음과 같이 근사적으로 표현가능하다. [3]

$$f(t) = f_o + \Delta f \cos(w_m t) \quad (1)$$

여기서 $w_m = 2\pi f_m$ 이며, 다양한 원인에 기인한 VCO의 표류 주파수이다. VCO에서 출력된 신호가 경로 A, 경로 B를 통해 Mixer3에 도달했을 때의 주파수 f_A , f_B 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} f_A &= f_{vm} + \Delta f \cos[w_m(t + T_A)] \\ f_B &= f_{vm} + \Delta f \cos[w_m(t + T_B)] \end{aligned} \quad (2)$$

f_{vm} 은 VCO의 출력 주파수이다. 시간지연 차로 인한 VCO의 영향만을 분석하기 때문에 경로 A내에 개입된 comb 발생기(f_{hm}), 저주파수 합성기(f_{LBS})의 시간지연 효과는 무시한다. 따라서 본 주파수 확장기의 출력신호의 주파수는 다음과 같다.

$$f_o = f_B - [(f_A - f_{hm}) - f_{LBS}] \quad (3)$$

식 (3)에 식(2)를 대입하여 전개하면,

$$\begin{aligned} f_o &= f_{vm} + \Delta f \cos[w_m(t + T_B)] - f_{vm} \\ &\quad - \Delta f \cos[w_m(t + T_A)] + f_{hm} + f_{LBS} \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 본 주파수 확장기의 출력주파수는 안정된 저주파수 합성기의 출력 주파수 f_{LBS} , comb 발생기의 n 차 출력 주파수 이외에 경로당 지연시간 T_A , T_B 에 의한 측대역 성분이 나타나게 된다. 식 (4)를 삼각함수 정리를 이용하여 다시 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_o &= f_{hm} + f_{LBS} + \Delta f_{dmax} \sin[w_m t \\ &\quad + \pi f_m(T_A + T_B)] \\ \Delta f_{dmax} &= 2\Delta f \sin[\pi f_m(T_A - T_B)] \end{aligned} \quad (5)$$

Δf_{dmax} 는 VCO의 표류성분과 두 경로간의 전달 지연차에 기인한 최대 주파수 편이량이다. 식 (5)에서 경로에 의한 시간지연 T_A , T_B 가 같을 경우 VCO의 주파수 변조 성분(식 5의 우측 3번째항)들이 최종 출력에서 서로 상쇄되어 출력 주파수의 스펙트럼상에 영향을 미치지 않는다. 따라서 이 경우에는 출력신호의 주파수는 단지 저주파수 합성기의 출력 주파수 f_{LBS} 와 comb 발생기의 출력 주파수 f_{hm} 의 합으로 결정된다. 그러나 식 (5)의 오른쪽 3번째 항은 VCO의 드리프트 잡음과 두 경로의 시간지연차에 기인한 잡음항인데, 이는 시간지연차가 존재하는 경우($T_A \neq T_B$)에 VCO 표류의 주파수 크기(f_m)에 따라 상쇄정도가 다르게 나타난다. 즉, VCO의 표류를 주파수 변조형태의 잡음이라 가정하고, 이 잡음의 주파수 성분(주파수의 시간 변화율)에 따라 상쇄정도가 유동적이라는 사

실이다. VCO의 현재 고정된 중심주파수에서 근접한 위상변조성분들 - VCO의 드리프트 잡음중에 낮은 주파수 성분($f_m \ll T_A - T_B$)들 - 은 두경로의 시간지연차에 영향을 덜 받아 거의 상쇄되지만, VCO의 현재 고정된 중심주파수에서 멀리 떨어진 위상변조성분들 - VCO의 드리프트 잡음중에 높은 주파수 성분($f_m \gg T_A - T_B$)들 - 은 두경로의 시간지연차에 영향을 많이받는다. 그림 4는 이러한 현상을 이용하여 VCO 표류 상쇄기(Drift canceller) 출력에서의 위상 잡음 상쇄정도를 개념적으로 나타내고 있다.

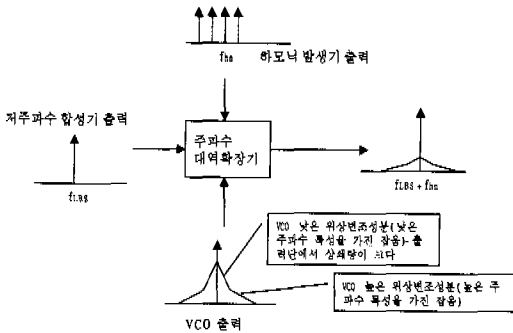


그림 4. VCO의 잡음 주파수의 크기에 따른 상쇄

III. 제작 및 측정결과

3.1 주파수 확장기의 설계 및 제작

표 2는 저주파수 합성기의 출력과 comb 발생기의 주파수에 따른 VCO의 주파수, 출력 주파수를 비교 제시한 것이다. 즉, 낮은 주파수 280~220 MHz 신호를(대역폭 60MHz)를 2140~1660MHz(대역폭 480MHz)의 주파수 신호원으로 대역폭을 확장하면서 주파수를 상향변환하기 까지 단계별로 주파수값을 제시했다.

본 주파수 확장기는 comb 발생기, VCO, 필터, Mixer등으로 구성된다. 두 경로내에 있는 필터의 군지연시간이 가능한 작아야한다. 그러기 위해서는 가능한 대역폭이 커야하지만, 이럴 경우 comb 발생기와 VCO 간의 신호혼합시 발생하는 스퓨리어스가 충분히 제거되지 못하여 출력단에 스퓨리어가 발생하는 원인이 된다.

표 2. 입출력 주파수 관계표.

구분	f_{VCO}	f_{HA}	f_{LBS}	f_0
1	2620	1860	280~220	2140~2080
2	2560	1800	280~220	2080~2020
3	2500	1740	280~220	2020~1960
4	2440	1680	280~220	1960~1900
5	2380	1620	280~220	1900~1840
6	2320	1560	280~220	1840~1780
7	2260	1500	280~220	1780~1720
8	2200	1440	280~220	1720~1660

그래서 대역폭의 절충점을 찾아야 하는데, 본 시스템에서는 중심주파수 760MHz에서 대역폭 10MHz인 필터를 사용하였다. 주파수 그룹은 크게 8개 그룹으로 나누어진다 이중 첫째 그룹의 단계별 주파수를 분석하여 보면, f_{VCO} 가 2620MHz로 조절되었을 때 comb 발생기의 여러 하모닉 차수중에 1860MHz 신호가 BPF#1에 의해 선택되고(BPF#1의 중심주파수가 760MHz이기 때문에), 이는 다시 f_{LBS} (280~220 MHz)와 신호 혼합되어 480~540MHz로 변환되어 BPF#2를 통과한다. BPF#2는 중심주파수가 510MHz, 대역폭이 62MHz인 필터를 사용한다. 이는 다시 f_{VCO} 와 신호 혼합되어 주파수가 2140~2080 MHz인 출력이 된다. 표 3은 이 장치의 중요 구성품의 제원을 제시한 것이다.

3.2 측정결과

제작한 본 주파수 확장기의 성능 시험은 그림 5과 같은 구조를 이용하출력 주파수, 스퓨리어스, 스위칭 시간 관점에서 수행되었다. 분해능이 5MHz, 출력 주파수 범위가 220 ~ 280MHz인 저주파수 합성기 모듈을 PLL을 이용하여 시험용으로 간단히 제작하였다.^[3-4] VCO의 입력 제어 전압은 DAC와 디지털 회로를 이용하여 간단히 제어할 수 있게 했다. 그림 6은 주파수 확장기의 출력 주파수를 스

펙트럼 분석기로 측정한 결과이다. 이는 제어기를 이용하여 VCO 출력 주파수(f_{VCO})를 2200MHz로 고정하고, f_{LBS} 를 275MHz로 조절했을 때의 결과이다. 주파수는 f_{VCO} 에 관계 없이 f_{VCO} 에 의해 결정된 comb 발생기의 특정 차수 1440MHz와 275MHz의 합으로 나타남을 확인할 수 있다. 스퓨리어스 특성은 -55dBc이하임을 알 수 있다. 그림 7은 BPF#1의 대역폭을 10MHz에서 40MHz 확장했을 때의 출력이며, 이는 Mixer1에 의해 생긴 스퓨리어스가 출력단에 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 BPF#1의 대역 선정에 주의해야 할 것이다.

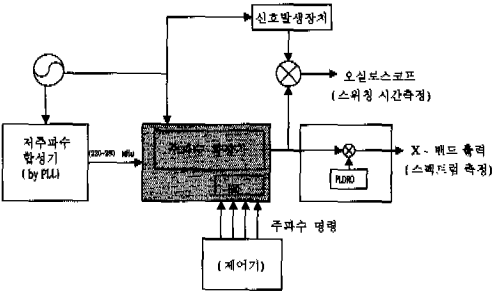


그림 5. 측정장치 구조

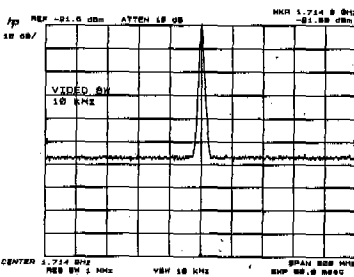


그림 6. BPF#1의 대역폭이 10MHz 일 때의 스펙트럼

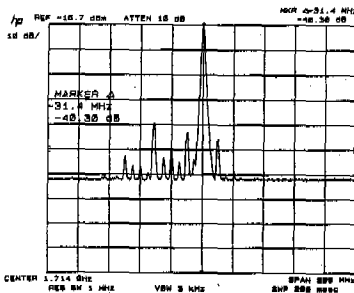


그림 7. BPF#1의 대역폭이 40MHz 일 때의 스펙트럼

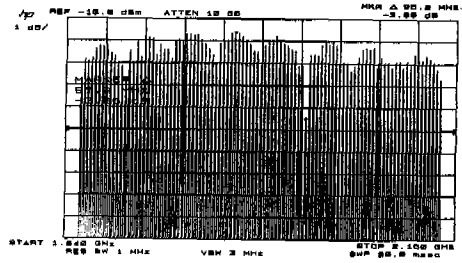


그림 8. 평편도 측정 스펙트럼.

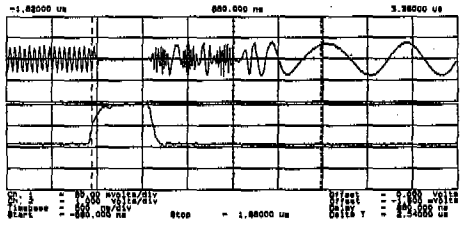


그림 9. 주파수 확장기의 주파수 변환시간.

그림 8은 PLL로 만든 저주파수 합성기^[4]를 5MHz 단위로 조절하고, VCO의 출력 주파수를 조절하였을 때 출력되는 전체 주파수 출력 결과이다. 평편도(flatness)는 최대 4dB 이하이다. 그림 9는 저주파수 합성기의 주파수를 220MHz로 고정하고 VCO 출력 주파수를 최대로 가변했을 때 (2200에서 2620MHz로) 출력 주파수의 스위칭 속도를 나타낸 것으로 2.54 μ sec 미만임을 확인할 수 있다.

아래 파형은 주파수 명령 스트로브(Strobe) 신호이고 위쪽 파형은 주파수가 변환되는 과정을 나타낸 것이다. 주파수 변환에 걸리는 시간은 VCO 입력 전압을 제어하는 회로의 시간지연으로 인한 결과이다. 따라서 고속의 디지털회로 DAC를 사용할 경우 스위칭 타임은 1 μ sec이하까지 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

그림 10은 본 주파수 확장기를 초고주파수 합성기로의 사용 가능성을 타진하기 위해 X-밴드 주파수로 상향변환(그림 5에서 최종 블록 부분 참조)한 결과를 스펙트럼으로 측정한 결과이다^[6]. 스펠 값을 달리하면서 측정한 이유는 Offset 주파수에 따른 위상 잡음을 측정하기 위해서이고, Offset 100Hz에서 -75dBc/Hz, Offset 1MHz에서 -110

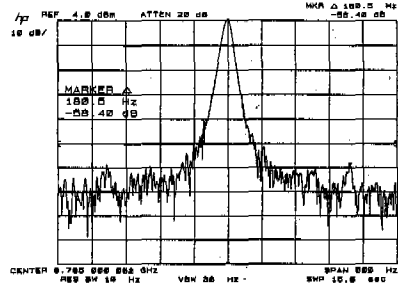
dBc/Hz 정도로 충분히 만족할 만한 결과를 나타냈다. 그림 11은 실제 제작한 저주파수 합성기(PLL에 의한), 주파수확장기의 실물 사진이다.

표 3. 주요부품 제원

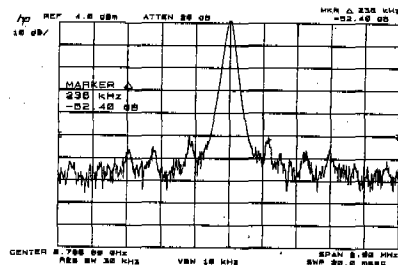
소자	전기적성능
comb 발생기 [5]	입력주파수 : 60MHz 입력레벨 : +10dBm 출력주파수 : $n \times 60 \text{ MHz}(n=1,2,\dots)$ 실제사용 주파수 : 1440~1860MHz 모델 : Omiyig사 CG237
VCO	출력 레벨 : +10 dBm 출력주파수 : 2~3 GHz Tuning Voltage : ~15V 모델 : Magnum HV72TC
BPF#2	삽입손실 : 1.5dB 중심주파수 : 510MHz 대역폭 : 62 MHz 제조회사 : K&L
BPF#1	삽입손실 : 2.0dB 중심주파수 : 760MHz 대역폭 : 10 MHz 제조회사 : K&L
Mixer1	국부/RF 주파수 : ~3.5 GHz , 10dBm IF : 5 ~ 1500MHz 변환손실(Conversion Loss) : ~5dBm(Max) 제조회사 : ANZAC
Mixer2	국부/RF 주파수 : ~ 1 GHz , 10dBm IF : ~ 500MHz 변환손실(Conversion Loss) : ~7dBm(Max) 제조회사 : ANZAC
Mixer3	Mixer1과 동일

초고주파수 광대역 주파수 합성기에서 사용할 수 있는 본 주파수 확장기는 간단하면서도 고속의 저잡음 특성을 가지고 있다. 신호혼합기 3개, VCO, 빗살 하모닉 발생기만으로 구현가능하고, VCO의 주파수 대역폭만 확장할 수 있다면 추가적으로 대

역폭을 확장할 수 있다. 분해능은 저주파수 합성기의 수치를 유지하고, 이러한 주파수 확장기를 다단으로 사용할 경우 초광대역이면서도 세세한 분해능을 가진 주파수 합성기를 제작할 수 있을 것이다.



(a) 스펠 : 500Hz



(b) 스펠 : 2MHz

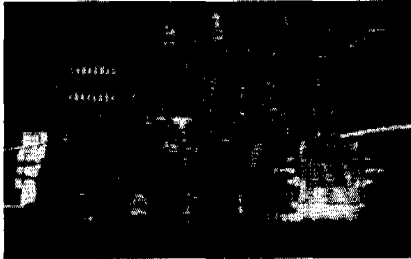
그림 10. X-밴드로 주파수 변환하였을 때의 스펠트럼

IV. 결론

설계 과정에서 주파수 플랜 결정은 최종단의 스퓨리어스를 결정하므로 주의해야 하며, 특히 BPF#1에서의 대역폭은 최종단의 스퓨리어스에 결정적인 영향을 미치므로 주의해야한다. 그리고, 제안된 구조에서 VCO의 전달 경로가 두 개로 나누어지는데, 이들 경로 간의 신호 전달 지연차가 VCO의 나쁜 위상 잠음(표류) 상쇄에 영향을 미치므로, 이들 지연차를 줄이는 노력이 필요하다. 그러나 상쇄 정도가 미약한 부분은 중심 주파수에서 멀리 떨어진 쪽 성분이므로 응용 분야에 따라 다르겠지만 대체로 잠음의 크기가 매우 낮으므로 고려하지 않아도 되겠다.

주파수 확장기의 스위칭 시간은 이 시스템이 주파수 합성기에 적용되었을 때 중요한 변수가 되며

로 실제 측정하였다. 스위칭 시간은 고주파수 부품에서의 신호 전달 보다는 VCO 제어 회로의 시간 지연에 의한 것으로 이는 고속의 DAC를 이용할 경우 더욱 개선할 수 있을 것이다.



(a) PLL로 만든 저주파수합성기



(b) 주파수확장기 기능확인을 위한 시제품

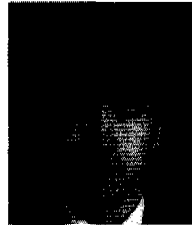
그림 11. 시제품의 실물 사진

April, 1967.

- [6] Shields, R. B. "Review of the Specification and Measurement of Short-Term Stability," *The Microwave Journal*, pp. 48~55, June 1969.

강 승 민(Seung-Min Kang)

정희원



1987년 2월 : 경북대학교

전자공학과졸

1990년 2월 : 경북대학교

공학석사

1990년 2월~1996년 3월 :

국방과학연구소 연구원

(레이다개발팀)

1996년 3월~현재 : 포항선린대학 정보통신과 전임

강사, 경북대학교 박사수료(광

통신분야)

<주관심 분야> 레이더 시스템, 주파수합성기 완전

광대역, 집적광학소자

참 고 문 헌

- [1] V. Manassewitch, 3rd ed., *Frequency Synthesizer Theory and design*, NewYork Weily, 1987.
- [2] Z. Galani and Richard A. Cambell, "An Overview of Frequency Synthesizer for Radars," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques.*, Vol 39, No. 5, pp. 782~790, May. 1991.
- [3] V. Kroupa, *Frequency synthesis : Techniques and Applications*, Wiely, 1973.
- [4] Sanneman, R. W. and T. R. Rowbotham, "Unlock Characteristics of the Optimum Type II PLL," *IEEE Trans. on Aerospace*, Vol ANE-11, pp 15~24, March, 1964.
- [5] S. Hamilton, R. Hall, "Shunt-mode Harmonic Generation using Step Recovery Diode," *Microwave Journal*, pp69~78,