저고도 탐지레이다용 고속 저잡음 주파수합성기 개발에 관한연구

윤인철, 김희식
서울시립대학교 전기전자컴퓨터공학부

Development of High Speed Low Noise Frequency Synthesize for Low Altitude Surveillance Radar

Inchul Yoon, Hiesik Kim
University of Seoul, Electrical and Computer Engineering

Abstract - 본 논문에서는 저고도 탐지레이다 센서체계의 주파수 합성기는 송수신 장치의 기준 주파수원으로 이용될 국부 발진 주파수들을 생성해 내는 주파수 합성부에 대해 설명되었다.

주파수 합성기의 성능을 평가하기위하여 각 주파수 원들의 위상잡음 특성과 주파수 합성기의 스위칭 시간을 신호 혼합기를 이용하여 측정 하였으며, 그 결과 설계 시 제시한 30(usec)이하인 약18usec의 스위칭 시간이 대부분을 차지함을 알 수 있었다. 주파수 합성기에서 생성된 최종 출력 주파수는 저고도 탐지 레이다의 송수신 장치의 국부발진 주파수로 이용되므로 출력 레벨의 flatness를 측정하여 분석한다.

1. 서 론

코히런트 레이다 시스템에서 클러터에 의해 재 반사되는 신호레벨이 크다면 국부 발진기의 위상잡음은 레이다 시스템의 동적 범위(dynamic range)를 제약하는 중요한 변수들 중의 하나가 된다. 예를 들어 비행체에 탑재되어 지상의 기동표적을 탐지하고자 하는 레이다 시스템은 국부 발진기의 위상잡음 영향으로 인하여 지상 클러터와 같이 레이다 유효 단면적(RCS:Radar Cross Section)이 큰 물체에 의해 재 반사되는 신호의 스펙트럼이 전차와 같이 RCS가 작으며, 기동하는 표적에 의해 반사되는 신호의 스펙트럼 성분을 가리게 되므로 탐지확률을 저하시키게 된다. (SCV: Sub Clutter Viability). 이와 같은 상황은 능선을 따라 접근하는 표적을 감시하고자 하는 저고도 탐지레이다 에서도 동일한 영향을 보이며. 대부분 전술적 상황이라 할 수 있다. 그리고 현대의 전장 상황은 날로 전자전 (ECM: Electronic Counter Measure) 위협이 증대되고 있는 상황이며. 이로부터 레이다 시스템이 정상적으로 동작하기 위해 여러 가지의 극복능력을 레이다 시스템에 부여하고 있다. 이 극복 능력들 중 매 송신 펄스마다 중심 주파수를 바꿀 수 있는 주파수 기민성(Frequency agility)은 상대방의 전자전 위협을 극복할 수 있는 방법으로 주파수원의 빠른 스위칭 시간을 요구하게 된다. 따라서 코히런트 펄스 도플러 레이다용 주파수 합성기는 위의 두 가지 능력. 좋은 위상잡음과 빠른 스위칭 시간을 보유하도록 설계되어야한다.

이 논문에서는 주파수 합성기의 성능을 평가하기위하여 직접 스펙트럼 방식을 이용하여 각 주파수 원들의 위상잡음 특성과 레이다의 대전자전 능력의 하나인 주파수 기민성을 평가하는 척도로 주파수 합성기의 스위칭 시간을 신호 혼합기를 이용하여 측정하였으며, 주파수 합성기에서 생성된 최종 출력 주파수는 저고도 탐지 레이다의 송수신 장치의 국부발진 주파수로 이용되므로 출력 레벨이 적당한 범위내에서 일정하게 유지되는지를 보기 위해서 출력 레벨의 flatness를 측정하여 분석하였다. .

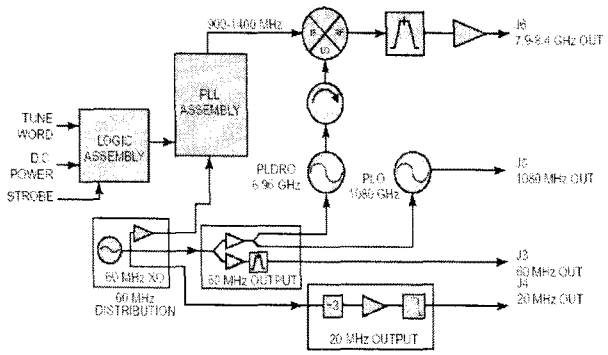
2. 레이다용 주파수 합성기 설계이론

일반적으로 주파수 합성기란 (Frequency Synthesis) 단일기준 주파수원을 이용하여 주파수 안정성이 매우 높고 합성방식에 따라 빠른 스위칭 특성을 가질 수 있다는 잇점 때문에 통신 시스템 . 정밀 계측용 기준 주파수원 그리고 레이다와 같은 첨단 전자장비에 까지 그 이용 범위가 광범위할 뿐만 아니라 지속적인 발전을 통해 고도의 전자기술 향상과 축적이 이뤄지고 있는 분야이다. 주파수 합성기는 응용범위와 시용될 시스템의 조건에 따라 요구되는 측정이 차이를 가지게 된다. 통신 분야에 쓰이는 주파수 합성기는 위상 잡음과 스위칭 시간에 대한 제약 조건에 융통성이 있지만 주파수 분해능이 좋아야하는 제약이 있다. 반면에 정밀계측용 시스템에 사용되는 주파수원은 특히 위상 잡음 특성이 뛰어나야 하므로 주로 위상 동기 루프 (Phase -Locked Loop)를 이용하게 되며, 따라서 스위칭 시간에 대한 제한은 없게 된다. 그러나 레이다와 같이 외부의 간섭으로부터 표적에 대한 정보를 추출하는 경우 빠른 스위칭 시간과 매우 좋은 위상 잡음 특성을 가지는 주파수 합성기가 요구되는데, 이 두 가지 특성은 서로 무관하지 않으면서 양립할 수 없는 관계를 가진다. 레이다용 주파수 합성기는 송수신 신호 사이의 시간 기준으로 이용되므로 다른 분야에 쓰이는 주파수 합성기에 비해 잡음과 스퓨리어스 그리고 스위칭 시간 특성에 대한 전기적 특성은 레이다 시스템의 사양으로부터 결정되며, 기계적인 특성은 적용 범위에 따라 결정된다. 표(1)은 전기적인 특성에 대한 요구 조건을 나타낸다.

항목	요 구 조 건
1.크기제한	지상용 레이다에 사용 할 때는 큰 제한을 받지 않지만 항공기용이나 미사일내에 장착될 때는 크기뿐만 아니라 무게가 소형, 경량화의 중요한 제한 요소가 된다.
2.차폐	차폐의 정도는 합성기별, 허용될 수 있는 스퓨리어스 레벨, EMI/ EMC의 고려정도에 따라 달라진다.
3.온도/진동	합성기의 전기적 기계적 설계에 영향을 주며, 온도는 열전도율과 사용되는 소자의 재질에 의해 결정된다.
4.스퓨리어스	스퓨리어스는 표적신호를 가리거나 의사표적(false target)을 만들므로 레이다의 성능을 저하 시키는 주요원인중의 하나이다. 따라서 스퓨리어스가 작은 구조를 가지는 주파수 합성기를 설계해야 한다.
5. 주파수 안정도	레이다의 경우 절대적인 주파수 안정도는 긴 적분시간을 가지는 장거리 레이다나 다른 전자 장비와 동기 되어야 하는 경우 반드시 고려되야 하는 요소이다.

<표 1> 레이다용 주파수 합성기의 전기적인 조건

레이다용 주파수 합성기는 표(1)에서 제시된 전기적 요구 조건등을 고려하여 설계될 수 있으며, 본 연구를 통하여 개발한 저고도 탐지레이다용 고속마이크로파 주파수 합성기는 코히런트 펄스 도플러 레이다의 송수신시 기준 주파수원으로 사용되고 레이다 시스템에서 사용되는 모든 신호를 생성한다. 따라서 저고도 탐지레이다의 송수신 장치 성능을 기준으로 하였다.



<그림 1> 레이다용 주파수 합성기의 기본 블럭도

3. 시스템의 전기적 성능특성 및 측정

3-1. 위상잡음 특성

펄스 도플러 레이다 시스템의 바닥 잡음 레벨에 대한 전기적 성능을 만족하는 주파수 합성기의 위상잡음 요구사양을 구하기 위해서는 우선 주파수 발진기의 위상잡음 곡선을 알아야 하고, 위상잡음 곡선을 구간별로 분리하여 전체 시스템바닥 잡음에 어느 정도 기여하고 있는지 해석해야한다. 주파수 발진기의 위장잡음 응답특성은 반송 주파수 근접영역과 멀리 떨어진 영역 및 두 영역사이 영역으로 구분하여 생각할 수 있다. 근접영역에서의 위상잡음 특성은 일반적으로 옾셑 주파수가 10배 증가함에 따라 20dB씩 감소함으로 결국 시간지연 함수 효과 때문에$1/(2\tau_{dt})$의 옾셑 주파수까지 평평한 특성을 보인다 . 근접영역에서의 이러한 상쇄작용으로 인해 평평한 응답은 직접적으로 시스템의 SCV특성에 비교되어진다. 또한 반송파에서 멀리 떨어진 영역의 위상잡음은 이미 평평한 특성을 가지므로 시스템 SCV에 미치는 영향은 근접영역의 경우와 유사하다. 하지만 근접영역과 먼 영역사이의 중간영역에선는 더 이상 평평한 응답곡선이 아니므로 일률적으로 시스템 SCV에 적용하기 곤란하다. 그리고 주파수 발진기의 위상잡음 곡선을 위와 같이 세 영역으로 분리하여 시스템 위상잡음 특성을 계산하고자 한다면 우선 각 영역의 위상잡음이 시스템 SCV 에 끼치는 영향은 동일하다는 가정이 이루어져야한다. 즉 세 영역에서의 누적된 위상잡음이 각각에 대한 SCV특성에서 4.7dB를 뺌으로서 각 부분에 대한 추적된 위상 잡음량을 같게 할 수 있다.

$$L_o = Pscv + 10\log(1/3) \qquad (1)$$

여기서 L_O :평평한 응답곡선(근접영역과 먼 영역)일때의 누적된 위상잡음 $Pscv$:sub clutter visibility 규격

우선 첫 번째 과정으로 반송 주파수에 근접한 위상잡음을 모델링하여 보면 근접영역은 $1/(2\tau_{dt})$의 옾셑 주파수까지이며, 위상잡음특성은 20dB/decade의 기울기를 가지고 있다. $1/(2\tau_{dt})$에 해당하는 옾셑 주파수에서의 위상잡음 한계를 수식화하면

$$L[\frac{1}{2\tau_{dt}}] = Pscv + 10\log(\frac{1}{3}) - 10\log(Bfft) - P_{dt} \qquad (2)$$

여기서P_{dt} : $1/(2\tau_{dt})$보다 큰 주파수에서 시간지연 함수의 첨두값(=6dB)이다. $1/(2\tau_{dt})$보다 낮은 주파수에 대해서는

$$L(fm)_1 = 10\log\left\{\left[\frac{1}{1+(fm/f_{3p})^2}\right]^1\right\} \qquad fm < \frac{1}{2\tau_{dt}} \qquad (3)$$

여기서 $fm = \dfrac{1/(2\tau_{dt})}{\sqrt{\dfrac{1}{\left[10^{LI/(2\tau_{dt})1/10}\right]^1} - 1}}$

이다 그리고 반송 주파수에 먼 영역에서의 위상잡음 공헌도는 샘플링 주파수에서부터 수신기 IF 대역까지 평평한 위상잡음 특성을 가지므로 근사화된 수식으로 표현하면

$$L(fm)_3 = P_{SCV} + 10\log(\frac{1}{3}) - 10\log(B_{FFT}) - 10\log(n_{af}) - P_{dt} \qquad (4)$$

여기서 n_{af} : aliasing fold의 개수(= B_{IF}/fp)

B_{IF} : 수신기의 IF 대역폭

이라 할 수 있다. 마지막으로 중간영역에 대한 위상잡음을 결정하여야 하는데, 주파수 발진기의 위상잡음은 급격히 변하지 않으므로 근접영역의 위상잡음 특성과 반송주파수에서 먼 쪽의 위상잡음 특성으로부터 유추가 가능한 것이다. 중간 부분의 연결 함수의 시작점은 옾셑 주파수가 $1/(2\tau_{dt})$이고 $L(\frac{1}{2\tau_{dt}})_1 dBc/Hz$의 위상잡음 특성을 가지고 있으며 최종적으로 $L(fm)_3 dBc/Hz$의 잡음 레벨이 되도록 하는 기울기를 가진 함수이다. 보드 선도 위상잡음 모델을 이용하여 연결함수를 구하여 보면

$$L(fm)_{23} = 10\log\left[\frac{1}{1+(fm/f_{3p2})^2}\right]^{R2} \cdot \frac{1}{2\tau_{dt}} < fm < f_{INT} \qquad (5)$$

여기서 n_2: 연결함수의 기울기를 결정하는 pole의 찻수

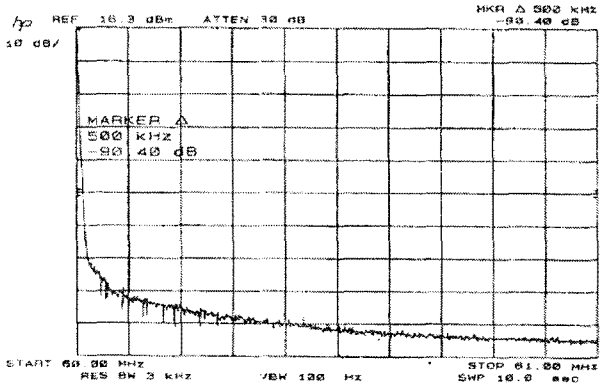
$f_{\int 3p_3} = \dfrac{1/(2\tau_{dt})}{\sqrt{\dfrac{1}{\left[10LI/2\tau_{dt}\right]^{1/n_2}} - 1}}$ 연결함수의 3dB인 주파수

$f_{3p_3} = \dfrac{1}{\sqrt{\dfrac{1}{\left[10LI/2\tau_{dt}\right]^{1/n_2}} - 1}}$ 반송주파수에서 먼 쪽의 잡음 바닥과 교차하는 주파수이다 식(3)(4)(5)를 통하여 각 부분별 위상잡음을 모델링한 후, 각 부분별 위상잡음 공헌도와 연결함수 식(1)의 누적된 위상잡음에 식(2)로 표현된 근접영역과 먼 영역에서의 누적된 위상잡음을 더 함으로서 SCV를 만족하는 주파수 발진기의 위상잡음 특성을 결정할 수 있다. 중간 영역의 위상잡음 공헌도는 연결함수로부터

$$L_{a_2} = 10\log\left[\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{1+(f(i)/f_{3p2})^2}\right]^{R2} + \left[\frac{1}{1+(f(i-1)/f_{3p2})^2}\right]^{R2}\right] \qquad (6)$$
$$\{f(i)-f(i-1)\} + 10\log(B_{FFT})$$

여기서 $f(i) = \dfrac{1}{2\tau_{dt}} + \mathrm{if}_p$이다 만일 식(6) 으로 누적위상잡음 량이 이 영역에 할당된 위상잡음 량 보다 클 경우에는 연결함수의 기울기를 증가시키고 반대로 모자라는 경우에는 기울기를 감소시키는 시행착오 과정을 거쳐야만 주파수 발진기의 전체적인 위상잡음 특성 곡선을 유추할 수 있다.

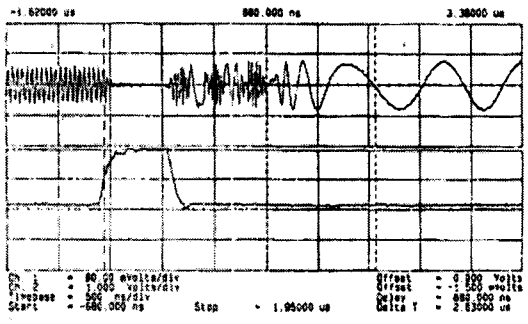
따라서 본 연구에서는 HP8566B스펙트럼 분석기를 이용한 직접스펙트럼 방법을 통해 고속 주파수합성기의 위상잡음 성능을 측정하였다.



<그림 2> 60MHz의 위상잡음 특성

3-2. 스위칭 시간 측정결과

저고도 탐지레이다용 고속 마이크로파 주파수 합성기는 소개했듯이 대전자전 능력의 하나인 주파수 가변성을 보유하기 위해서 펄스와 펄스 사이에 주파수 변경이 빨라야 하며, 따라서 고속의 스위칭 시간 (제시된 설계 목표치:(30us)을 구현하기 위해서 스위칭 시간이 빠른 직접 디지털 합성기를 이용하여 직접 주파수 합성 기법으로 설계되었다. 스위칭 시간 측정은 신호혼합기와 혼합되는 기준 주파수원으로 HP341B Synthesizer Sweeper 를 이용하였고 기준 주파수원과 피 측정 주파수 합성기와의 동기를 맞춰주기 위하여 기준 주파수원의 REF OUT을 피측정 주파수원의 REF IN에 연결하였다. 신호 혼합기의 출력은 DC에서부터 기준 주파수원과 피측정 주파수 합성기와의 주파수 차를 출력하게 되며, 시간은 주파수 합성기의 출력 주파수를 7.86GHz→8.36로 변경했을 때의 스위칭 시간으로 약 18(usec)의 시간이 경과함을 알 수 있었다. 결과는 그림 3과 같다.

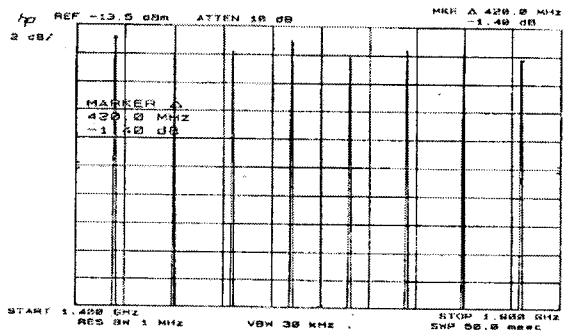


<그림 3> 출력 주파수의 스위칭 시간

3-3. 출력 레벨 Flatness 특성 측정

고속 마이크로파 주파수 합성기는 입출력 특성중 스퓨리어스나 주파수의 순수도 이외에 최종 출력(STALO1)에서의 전력레벨 flatness또한 중요한 측정 항목이다. 송신시에 종단 전력 증폭기의 정상 구동전력 레벨을 일정하게 유지하기 위해서는 신호 레벨도 일정한 범위내에 균일하게 유지해 주어야한다. 일반적으로 신호 혼합기의 변환손실(conversion loss)은 국부 발진 포트의 전력에 대해 변하므로 신호 레벨의 flatness를 유지하기 위해서 국부 발진 포트에 입력되는 전력을 되도록 균일하게 유지해줘야 할 것이다. 그리고 수신기의 첫 번째 신호 혼합 과정에서도 STALO1의 출력 레벨이 일정하게 유지되지 않는다면, 표적에 의해 재 반사된 신호의 신호혼합 시 변환 손실이 일정하게 유지되지 못하게 된다.

측정결과는 LBS(DDS)의 출력 flatness로 약 ±0.7dB오차를 보인다.



<그림 4>comb발생기의 출력레벨 flatness 측정결과

4장. 결론

본 논문에서는 저고도 탐지레이다 센서체계의 주파수 합성기는 송수신 장치의 기준 주파수원으로 이용될 국부 발진 주파수들을 생성해 내는 주파수 합성부에 대해 설명되었다. 주파수 합성부는 주파수 기민성과 같은 대전자전 능력을 보유하고 표적으로부터 반사되는 작은 신호 레벨까지 검출해 내기 위하여 빠른 스위칭 시간과 좋은 위상잡음 특성을 가질 수 있도록 직접 합성법을 이용하여 설계되었다. 주파수 합성기는 기준 주파수 발생기, 저주파 대역 합성부, 주파수대역 확장 및 1차주파수 상향 변환부(drift/canceller)로 나누어 설계되었다. 주파수 합성기내의 기준 주파수 발생기는 매우 안정된 60MHz로 송신과 수신시에 필요한 1080MHz 를 만들어낸다. 저주파 대역 합성기는 빠른 스위칭 시간과 좋은 위상잡음 특성을 가지는 직접 디지털 합성기와 위상동기루프 방식을 이용하여 구현하였으며, 주파수 합성기의 주파수 분해능 (10MHz)과 위상잡음 특성 및 스퓨리어스 특성을 결정한다. 직접 디지털 합성기로 ADS-432-303을 이용하였고 출력 주파수 900~1400MHz 이다. 이와 같이 1차에 걸친 주파수 상향변환 및 대역 확장된 주파수들은 60MHz를 받아 위상 동기시켜 만들어낸 6.96GHz의 안정된 마이크로파 국부 발진기와 최종 신호 혼합되어 원하는 출력주파수인 7.9~8.4GHz의 주파수를 생성하게 된다. 주파수 합성기의 성능을 평가하기위하여 직접 스펙트럼 방식을 이용하여 각 주파수 원들의 위상잡음 특성을 측정하였다. 레이다의 대전자전 능력의 하나인 주파수 기민성을 평가를 위한 척도로 주파수 합성기의 스위칭 시간을 신호 혼합기를 이용하여 측정 하였으며, 그 결과 설계 시 제시한 30(usec)이하인 약18usec의 스위칭 시간의 대부분을 치지함을 알 수 있었다.주파수 합성기에서 생성된 최종 출력 주파수는 저고도 탐지 레이다의 송수신 장치의 국부발진 주파수로 이용되므로 출력 레벨이 적당한 범위 내에서 일정하게 유지되는지를 보기 위해서 출력 레벨의 flatness를 측정하여 분석하였다.

참고문헌

[1] Frequency Synthesizer Theory and Design , Vadim Manassewitsch, John Wiley & Sons, 1987

[2] ALAZ, M-SAM SYSEM DESIN CONCEPT, 1996

[3] ALAZ, Final design reports on the transmiter of the MRF, CODL #8, 2000.

[4] Merrill I. Skolnik, Radar hand book, McGraw_Hill, 1990.

[5] Freed E, Nathanson, Radar design Principles McGraw_Hill, 1991.

[6] Stanley J. Goldman, Phase noise analysis in radar systems using personal computers, John Wiley & Sons,1989.

[7] Freed E, Nathanson, Radar design Principles McGraw_Hill,1991.

[8] Stanley J. Goldman, "Eyeballing oscillators for pulsed Doppler radar," Microwaves & RF,Mar.. pp.99-179, 1985.

[9] Stanley J. Goldman, "Oscillators Phase noise proves important to pulse Doppler radar systems,"Microwave System News, Feb. pp.88-100, 1984.