

마이크로웨이브를 이용한 주파수변조 연속파 레벨트랜스미터의 개발

최우진, 지석준
한라레벨(주)

Development of FMCW Level Transmitter

Woo-Jin Choi, Suk-Joon Ji
HANLA LEVEL Co., Ltd.

Abstract - 액체탱크의 레벨을 정밀측정하는 데 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)를 이용하고자 한다. 우리는 1GHz 대역폭으로 Sweep하는 Frequency Source Module을 개발하여 테스트 중이다. 개발한 송수신 모듈은 주파수의 송수신을 위한 주요부품들로 구성되는데, VCO(Voltage Controlled Oscillator), 서큘레이터(Circulator), 필터(Filter), 전력분배기(Power Divider), PLL(Phase Locked Loop)제어부, 믹서, 증폭기 등이 그것이다. 이들 부품들이 위치한 RF Board와, 패키지로 구성된 안테나를 이용하여 마이크로웨이브 신호를 송수신할 수 있으며, 송수신한 신호 간의 차주파수(beat frequency)성분을 측정하면 거리정보를 획득할 수 있다. 차주파수의 아날로그신호는 DSP를 이용하여 FFT를 수행하여 주파수 성분을 찾아 거리계산을 하도록 개발하였다.

거리 측정의 성능에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 안정된 주파수를 만들어 낼 수 있느냐 하는 것이다. 본 논문에서는 제작한 VCO 모듈을 비롯한 개발 중인 각 모듈들을 소개하였다. 향후 VCO의 선형성 개선과, 난반사에 대한 Echo Cancel 알고리즘을 적용하여 제품의 상용화를 목표로 한다.

1. 서 론

1864년 맥스웰은 전자기 이론에서 레디오 파의 존재를 예견하였으며, 1904년 힐스메이어는 레이더 장치의 세계적인 특허를 출원하였다. 이후, 레이더는 세계 2차대전 이후의 영향으로 군사적 목적의 분야에서 급속하게 기술의 발전을 이루었다. 오늘날 레이더 기술은 우리 일상 생활의 한 부분이 되었다. 마그네트론이 전자레인지에서 이용되며, 연속파(CW) 레이더는 자동차 감지, 자동차 속도측정에 이용된다. 다른 민간용으로는 항공 교통 제어, 선박용, 기상용 레이더를 들 수 있다. 그 외에도, 천문관측소, 탐사용 로켓 등 그 활용분야가 다양하다.

본 논문에서는 유조선, 화학 운반선과 같은 액체탱크를 보유한 선박에 주로 적용되는 탱크레벨 트랜스미터에로의 응용에 대해 소개한다. 비교적 짧은 거리의 측정에 사용되는 주파수 변조 연속파(FMCW) 방식의 레이더 레벨미터로 화물탱크(Cargo Tank)의 레벨측정에 이용된다. 선박에서의 탱크는 선박의 균형을 유지하기 위한 밸러스트 탱크와 액체 화물을 싣는 화물탱크로 구분할 수 있다. 화물탱크는 화물의 운송과 직접적으로 관련되는 탱크이며, 적은 양의 레벨(액체의 높이) 차이에도 많은 양(불륨)의 차이가 발생하게 되므로 정확한 측정을 위해 정밀한 계측이 요구된다. FMCW 레이더를 이용한 레벨측정은 비접촉식이며, 조음과 방식에서 발생하는 온도, 압력, 유증기, 분진, 소음에 의한 오차가 없어 선호되는 정밀레벨계측 방식 중의 하나이다.

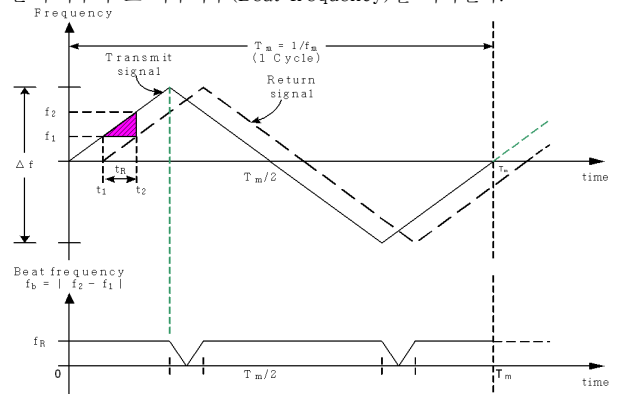
현재 우리나라를 비롯한 세계 주요 조선소에서 설치되는 선박용 레이더 레벨 트랜스미터는 SAAB, Enraf Marine, Vega, Krohne, Musasino, Mobrey 등의 회사 제품으로, 주요 선진국은 이미 상용기술을 확보하고 있다. 우리는 이들 제품의 특징을 분석하고, 레이더 레벨 트랜스미터를 이용한 계측기술을 자체적으로 확보하고자 한다. 여기에서는 주로 VCO의 제어를 통한 선형적인 Sweep 주파수를 얻는 모듈의 개발에 관하여 다루고자 한다.

2. FMCW 레이더 트랜스미터의 개발

2.1 개발의 개요

거리측정의 원리를 간단히 살펴보면, 레벨트랜스미터의 송신 주파수는 이미 알고 있는 두 주파수 f_1 , f_2 사이를 변조하며, 송신신호와 수신된 에코신호 사이의 차이 f_b 가 측정된다. 이 차주파수는 왕복시간에 비례하고, 따라서 거리에 비례하게 된다. FMCW 레이더 이론은 간단하지

만, 실제적인 제작에는 고려해야할 문제들이 적지 않다. FMCW 레이더 레벨 트랜스미터는 전압 제어 오실레이터 즉, VCO를 필요로 하며, 이것이 두 송신주파수 f_1 과 f_2 간에 램프 신호를 발생시킨다. 즉, 주파수 소인(sweep)이 되어야 하며, 가능한 한 선형적으로 변화해야 한다는 점은 매우 중요하다. 선형적인 주파수 변조는 주파수 출력의 페르프 조정 기능을 가지는 PLL 회로에 의해서, 혹은 온도보상이 고려된 VCO 출력 주파수의 선형화 등으로 이루어질 수 있다. 다음의 <그림1>은 송수신 주파수와 그 차주파수(Beat frequency)를 나타낸다.



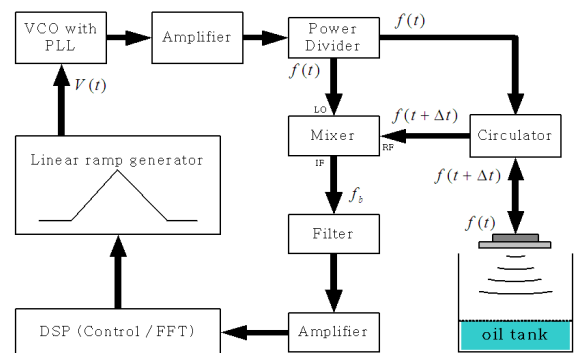
<그림 1> FMCW 레이더 레벨트랜스미터의 송수신 주파수 및 차주파수

거리는 위의 차주파수와 전파속도를 고려하여 다음의 식으로 간략히 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{cf_R}{4f_m \Delta f} \quad (2.1)$$

여기에서, R 은 거리(Range)로 알고자 하는 값이며, c 는 전파의 속도 상수, f_R 은 측정된 거리에 대한 차주파수, f_m , Δf 는 설계값으로 이 미 아는 값이며 각각 변조주파수의 주파수와 변화폭을 나타낸다. 액체의 레벨은 정지 타겟이라 간주할 수 있으므로 도플러 천이 주파수는 고려하지 않았다. 이상의 거리측정 원리로부터, 마이크로웨이브의 송수신을 위해 다음의 크게 1)RF부 2)아날로그 및 DSP 제어부, 3)안테나부가 필요하다.

우리는 0.6~40m의 측정거리, ± 1 mm의 거리분해능을 가지는 1GHz로 Sweep하는 FMCW 레벨트랜스미터 개발을 최종목표로 연구 중이다. <그림 2>에 전체 시스템의 블록도를 나타내었다.



<그림 2> FMCW 레이더 레벨트랜스미터의 시스템 블록도

2.2 RF 부

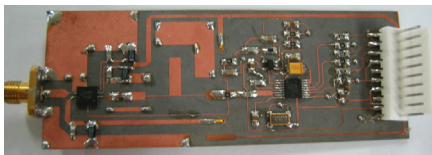
RF부는 다음의 <표 1>의 기능을 담당하는 마이크로스트립 패턴 및 주요부품들로 구성되어 있다.

<표 1> RF부의 핵심 요소 및 기능

번호	핵심 요소	기능	비고
1	VCO 및 PLL	선형적인 주파수 Sweep	1GHz 대역폭
2	Power Divider	송신 신호의 분배	윌킨슨 회로
3	Circulator	송수신 커플러	Ring-Hybrid Coupler
4	Mixer	주파수 합성	차주파수의 출력
5	Filter	잡음성분 제거	수신 잡음신호 제거
6	Amplifier	증폭	신호증폭

1) VCO 및 PLL

VCO(Voltage Control Oscillator)는 전압에 따라 출력 주파수가 제어될 수 있는 소자인데, 온도나 소자의 특성, 주변환경요인에 의하여 출력주파수가 영향을 받는다. 즉, 선형적인 제어전압의 입력에 대해 주파수의 출력이 선형적이지 못하다. FMCW 레이더에서 사용하고자 하는 주파수는 1GHz 대역폭을 가지는 비교적 넓은 영역을 이용해야 하므로, 전 구간에 대한 선형성 확보를 위해 PLL(Phase Locked Loop)를 구성하여 주파수 출력을 제어한다. 본 연구에서는 VCO 소자로서, Hittite사의 MMIC형태의 HMC510LP5를 사용하였다. 이 소자는 출력 주파수의 범위가 8.45GHz~9.55GHz이며, 약 1GHz의 대역을 가진다. 소자의 RF_{out} 신호를 출력주파수로 사용하였으며, RF_{out}/4 신호를 PLL 회로의 RF주파수 입력으로 사용하였다. <그림 3>은 제작한 VCO 및 PLL 모듈을 나타낸다. Oscillator로 인한 위상잡음과 Reference Spurious를 억제하기 위하여 VCO의 RF_{out}/4 출력단에 저역통과필터를 추가하였다. 저역통과필터는 RF_{out}/4보다 높은 고주파를 제거하여 PLL에 의한 위상잡음과 Reference Spurious를 억제하고자 하였다.



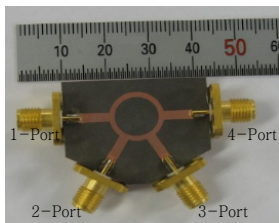
<그림 3> 제작된 VCO 및 PLL 제어 모듈

2) 전력 분배기(Power Divider)

전력 분배기는 포트1로 입력되는 전력을 포트2와 포트3으로 나누어 주는 역할을 한다. 포트1은 증폭기를 통해 증폭된 송신 주파수를 입력받아 포트2를 거쳐 Mixer로 보내지고, 포트 3의 출력 신호는 Circulator로 보내진다. 윌킨슨(Wilkinson) 전력 분배 회로를 이용하였다.

3) Circulator

하나의 안테나로 송·수신을 동시에 할 경우에 송·수신을 구분하기 위해 사용한다. 여기에서는 Rat Race Ring이라 불리는 Ring Hybrid Coupler로 제작하였다. 하나의 포트에서 입력이 들어오면 두 개의 포트에서 -3dB 출력이 균등하게 나가고, 나머지 하나의 포트에서는 출력이 나가지 않는다. 또 Hybrid Coupler이므로 두 개의 포트로 나가는 균등한 출력 신호는 180°의 위상 차이를 가진다.



<그림 4> 제작된 Ring Hybrid Coupler

4) Mixer

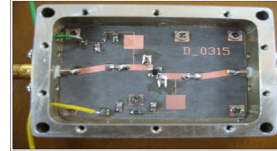
Mixer에서는 안테나에서 수신된 신호와 전력 분배기에서 분배된 신호를 혼합한다. 혼합된 신호는 최종적으로 DSP에서 거리 정보로 계산된다. FMCW 레이더에서 목표물에 의해 반사된 신호는 매우 미약하므로 Mixer는 저잡음 특성이 우수해야 제대로 된 신호를 출력할 수 있다. 또, LO와 RF 포트는 X-밴드 주파수 대역의 입력을 지니며, IF포트로 두 신호의 차주파수를 출력한다.

5) Filter

Filter는 Mixer에서 혼합된 주파수 중 원하는 대역을 선택하기 위해 필터를 잡음제거의 용도로 사용하였다. Coupled Line Filter로 제작하였다.

6) Amplifier

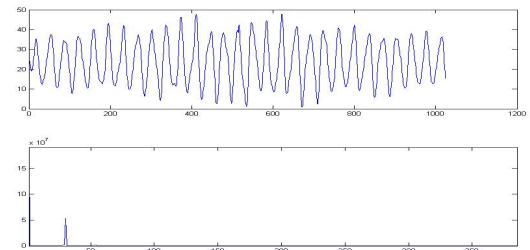
NEC사의 NE3503M04 FET를 이용하여 <그림 5>와 같이 X-밴드 증폭기를 설계 제작하였다.



<그림 5> 제작한 Amplifier

2.3 아날로그 및 DSP 제어부

아날로그 신호처리부의 최종 출력 값은 차주파수에 대한 시간영역의 아날로그 신호이다. 이 신호로부터 주파수 성분을 계산하기 위하여 DSP를 이용한 고속 푸리에 변환(FFT : Fast Fourier Transform)을 수행하였다. FFT에는 DIT 방식과 DIF 방식이 있으며, 본 연구에서는 DIF(decimation-in-frequency) 방식을 사용하였다. <그림 6>은 AD 컨버터의 입력 신호와 1024 point의 FFT를 수행한 주파수 스펙트럼을 나타내었다.



<그림 6> AD입력 신호와 FFT 결과

본 연구에서는 신호처리용으로 Texas Instrument사의 TMS320C6711 DSP칩을 사용하였다. TMS320C6711은 실수 연산 프로세서이다. 32비트 동작을 하며 동작 주파수는 200MHz이다. 거리별 차주파수를 분석한 결과, 계산에 의한 차주파수와 측정된 차주파수 사이에 평균 5Hz 정도의 오차가 발생하였으며, 약 6cm의 오차를 가졌다.

3. 결 론

비교적 단거리를 정밀 측정하는 FMCW 레이더의 개발진행과정을 소개하였다. FMCW 레이더의 핵심요소인 선형 Sweep 제어 회로를 구현하기 위해 VCO 및 PLL을 적용하여 발진기를 제작하였다. 그리고, 저역통과필터를 추가하여 위상잡음과 Reference Spurious의 특성을 개선하였다. VCO의 제어는 전체 성능에 큰 영향을 미치는 만큼, 향후 Spurious 레벨을 유지하며 PLL 회로의 락타임을 줄이는 등의 연구를 계속할 계획이다. 마지막으로, 전자기파의 송수신 및 거리정보의 추출에는 성공하였으나, 실제 거리와 측정 거리 사이의 오차가 존재한다. 이를 차주파수 신호에 대한 DSP 신호처리 및 VCO의 선형성 연구를 통해 개선할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Dean Banerjee, "PLL Performance, Simulation, and Design 3rd Edition", National Semiconductor, 2003.
- [2] VĚNĚSLAV F. KROUPA. PRINCIPLES OF PHASE LOCKED LOOPS(PLL) Presented at the 2000 IEEE Int'l Frequency Control Symposium Tutorials June 6, 2000.
- [3] Guillermo Gonzalez, "MICROWAVE TRANSISTOR AMPLIFIERS Analysis and Design SECOND EDITION", Prentice Hall, 1997.
- [4] Thomas Musch, "A High Precision 24-GHz FMCW Radar Based on a Fractional-N Ramp-PLL", TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 52, NO. 2, APRIL 2003.
- [5] M. Vossiek, T.v. Kerssenbrock and P. Heide, "Novel Nonlinear FMCW Radar for Precise Distance and Velocity Measurements", IEEE MTT-S Digest, 1998.

본 기술은 "산업자원부 지역산업기술개발사업"의 지원을 받아 개발되었습니다.