

레이더 송수신기용 X 밴드 주파수 합성기에 관한 연구

박동국† · 이현수*

(원고접수일 : 2006년 3월 9일, 심사완료일 : 2006년 5월 9일)

A Study on X-band Frequency Synthesizer for Radar Transceiver

Dong-Kook Park† · Hyun-Soo Lee*

Abstract : In this paper, a frequency synthesizer for X-band FMCW radars is proposed. Some X-band FMCW radars have been used as a level sensor for tanker ship and the resolution of the level sensor may be mainly depend on linearity of frequency sweep. For a linear frequency sweep, the proposed synthesizer employs a phase-locked loop using prescalars and a high speed digital PLL chip. The measured results show that the linear frequency sweep range is from 10 GHz to 11 GHz and the output power of the synthesizer is minimum 7 dBm, and the phase noise is about -80 dBc/Hz at 100 KHz offset from 11 GHz.

Key words : Frequency modulated continuous wave(주파수 변조 연속파), Radar(레이더), Frequency synthesizer(주파수 합성기)

1. 서 론

단일안테나를 사용하는 호모다인 주파수 변조 연속파(Frequency Modulated Continuous Wave: FMCW) 레이더는 근거리 감지센서 및 전파 고도계, 차량용 충돌방지 장치 등 여러 응용분야에서 많이 사용되고 있다^{(1),(2)}. 본 논문에서는 화물 선박 등의 탱크에 들어있는 내용물의 레벨을 측정하는 레벨 센서의 기능을 수행하는 FMCW 레이더를 개발하고자 한다. FMCW 레이더는 선형적으로 주파수가 변하는 송신신호와 목표 물체에서 반사되어 레이더로 수신되는 수신신호와의 주파수 차를 이용하여 목표 물체의 거리를 판별하게 된다.

화물선박의 탱크 레벨 센서로 사용되기 위해서는 분해능이 수 mm 정도가 되어야 한다⁽³⁾. 이러한 고분해능을 얻기 위해서는 무엇보다도 시간에 따라 주파수 변화가 선형적으로 변하는 신호원이 필요하다. 송신 신호가 선형적이지 못하면 송수신 신호의 차주파수인 비트(Beat) 주파수가 대역폭을 갖게 되어 주파수 판별에 오차를 주게 되고, 따라서 분해능이 나빠지는 원인이 된다.

본 논문에서는 선형적인 주파수 변화를 갖는 신호원으로 위상동기루프(Phase Locked Loop : PLL)를 사용한 주파수 합성기를 개발하고자 한다. 주파수 합성방식은 직접 주파수 합성 방식과 간접 주파수 합성 방식으로 나눌 수 있다^{(4),(5)}. 직접 합성

† 책임저자(한국해양대학교 전자정보통신공학부), E-mail:dkpark@mail.hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4311

* 한국해양대학교, 전자통신학과

방식은 빠른 주파수 스위칭 시간과 낮은 위상잡음을 나타내는 장점을 갖고 있지만, 구조의 복잡성과 많은 수의 스퍼리어스 신호를 발생시킨다는 단점을 갖고 있다. 이에 반해 간접 합성 방식은 스위칭 시간이 길지만 스퍼리어스 신호에 의한 영향이 적고, 구조가 간단하며, 케환 루우프를 사용해서 위상 잡음을 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다.

본 논문에서는 위상잡음과 스퍼리어스 영향이 적은 간접 주파수 합성 방식을 이용하여, 10 GHz ~ 11 GHz 주파수 대역에서 선형적으로 동작하는 주파수 합성기를 설계 및 제작하고자 한다.

2. 주파수합성기 설계 및 제작

간접 주파수 합성기는 기본적으로 PLL에 의한 케환 방식으로써 위상검출기(Phase Detector : PD), 루우프 필터(Loop Filter : LF), 전압 제어 발진기(Voltage Controlled Oscillator: VCO), 분주기(Divider) 등으로 구성되며, 케환회로의 주파수 분주율을 변화시켜 출력주파수를 조절한다^{(5), (6)}. 통상 위상검출기에 입력되는 기준신호발생기(Reference Oscillator)는 위상잡음 특성이 아주 우수한 수정발진기를 사용하게 되는 데, 이것은 주파수가 수 백 MHz 대역이므로 10 GHz ~ 11 GHz 대역의 VCO 신호와 위상 비교를 하기 위해서는 주파수 합성기 시스템을 구성할 때 주의를 해야 한다. 수 백 MHz와 10 GHz 대역의 두 신호를 위상 비교하여 선형적으로 변하는 신호원을 만들기 위해서는 주파수 합성기 시스템을 크게 다음의 세 가지 방법으로 구현 할 수 있다.

첫째, 안정적인 저주파수 대역의 기준신호 발생기의 주파수를 주파수 체배기를 통해 VCO 출력 신호 주파수 대역으로 만들어 위상검출기에 입력하는 방법이 있다. 그러나 체배를 통해 얻어진 신호의 위상잡음 특성은 저주파 대역의 기준신호발생기의 위상잡음 특성에 비해 일반적으로 좋지 않으므로 위상검출기의 기준신호원으로 사용하기에 적합하지 않다. 더구나 10 GHz 대역의 위상검출기 설계도 쉽지 않다.

두 번째는 VCO 출력신호를 혼합기를 사용하여

주파수를 저주파수 대역으로 낮추어 기준신호발생기의 신호와 위상 비교를 하는 방법이 있다. 이 방법에 사용되는 혼합기의 국부발진 신호원은 X밴드의 발진주파수를 가지면서 위상잡음 특성이 아주 우수해야 한다. 위상잡음 특성이 우수한 X 밴드 발진기는 유전체 공진기 등을 사용하여 제작이 가능하다.

세 번째는 X 밴드의 VCO 출력 주파수를 프리스케일러(Prescaler)를 사용하여 저주파수 대역으로 주파수를 낮추고, 이것을 기준발진주파수와 위상비교를 하는 방법이다. X 밴드 대역에서 구동이 되는 프리스케일러를 사용하면 다른 방법에 비해 비교적 쉽게 구현이 가능하므로 본 논문에서는 이 방법을 사용하여 주파수 합성기를 제작하였다.

Fig. 1에 본 논문에서 설계한 주파수 합성기의 블록도를 나타내었다.

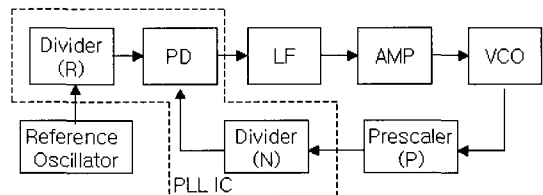


Fig. 1 Block diagram of proposed frequency synthesizer

기준신호발진기에서 발생된 신호는 안정된 주파수와 낮은 위상잡음 특성을 나타내며, 주파수 합성기의 출력주파수 해상도를 조절하기 위해서 사용하는 R 분주기에 인가된다. 위상검출기(PD)는 R 분주된 기준신호와 케환회로를 통해 인가되는 출력주파수의 위상을 상호 비교하여 신호의 위상차에 비례하는 전압을 발생시킨다. 또한 루우프 필터(LF)는 위상검출기(PD)의 출력 전압에 포함된 고주파 성분을 제거하고, 검출기의 출력전압이 VCO에서 요구하는 제어전압 범위가 되도록 변환시키며, 전체 주파수 합성기의 위상 전달특성과 대역폭을 결정한다. 단일 루우프 구조에서 루우프 필터(LF)는 저역통과 특성을 나타내며, 스위칭 시간, 측파대, 스퍼리어스 잡음, 위상잡음 등에 영향을 미친다⁽⁷⁾.

본 논문에서 목표로 하는 10 GHz ~ 11 GHz 까지 선형적으로 동작하는 주파수 합성기 제작을 위

해 VCO를 9.5 GHz ~ 11 GHz에서 동작하며, 약 +10dBm의 출력 전력을 발생하고 낮은 위상잡음 (-85 dBc/Hz @ 100kHz offset)을 나타내는 VTO-8951 제품을 사용하였다.

그리고 기준신호 발진기는 안정성이 매우 높고, 낮은 위상잡음 특성을 갖는 12.8 MHz의 TCXO를 사용하였다.

기준신호발생기의 주파수와 VCO 출력 주파수 및 분주기(N, R)의 특성을 고려하여 프리스케일러의 분주값을 16으로 설정하고 4분주 프리스케일러 두개를 직렬 연결하여 16분주 프리스케일러를 구현하였다. 사용한 4분주 프리스케일러는 HMC365G8, HMC433으로 10 GHz ~ 11 GHz의 VCO 출력 신호가 프리스케일러를 통해 16분주되어 625 MHz ~ 687.5 MHz로 낮아진다.

분주기 N, 분주기 R 및 위상검출기(PD)는 PLL IC 칩 LMX2326을 사용하여 구현하였다. 분주율 N 및 R은 직렬 데이터의 디지털 신호에 의하여 조절하며, 직렬 데이터를 보내기 위하여 PC를 사용하였다. 기준신호발진기에서 인가되는 12.8 MHz 신호를 R 분주기를 통해 128로 분주하여 100 KHz 주파수로 변환하고, 이를 위상검출기에 기준 신호원으로 인가하였다. 또한 PLL칩 내의 N 분주기는 PC로부터의 직렬 데이터 신호에 따라 프리스케일러의 출력신호 625 MHz ~ 687.5 MHz를 6250 ~ 6875로 분주하여 위상검출기에 인가하였다. 즉 100 kHz의 주파수 해상도를 갖도록 설계 하였다.

Fig. 1의 단일 루우프 필터(LF)는 저역통과 여파기로서 위상 검출기의 출력을 안정된 직류 전압으로 만들어서 VCO에 공급해 주며, 주파수 분주기와 함께 PLL회로의 대역폭을 결정하는 부분이다. 그리고 Fig. 1에서 증폭기는 루우프 필터(LP)의 출력 레벨과 VCO 입력 레벨의 차이를 보상하기 위해 설계한 것이다. Fig. 2에 본 논문에서 설계한 3차 저역통과 여파기로 구현된 루우프 필터와 증폭기 회로를 나타내었다. 설계된 루우프 필터의 대역폭은 10 KHz 이다.

두께 0.635mm, 상대유전율 $\epsilon_r = 9.5$ 인 Taconic 회사의 CER-10 유전체 기판을 사용하여 제작된 단일 루우프 주파수 합성기의 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

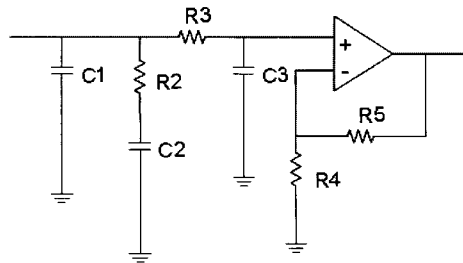


Fig. 2 Loop filter and amplifier circuits

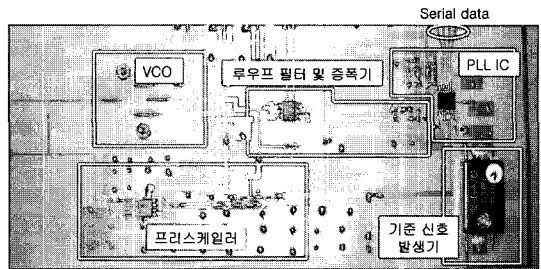


Fig. 3 Photo of the developed frequency synthesizer

3. 측정 결과

제작한 주파수 합성기에서 N 분주기의 분주율을 6875로 설정하였을 때, VCO 출력 주파수 11 GHz 신호의 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다. 또한 11 GHz 신호를 프리스케일러에 입력한 후 출력 신호의 스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 프리스케일러 출력으로 11 GHz 신호를 16분주한 687.5 MHz가 정확히 나타나는 것으로부터 프리스케일러에서 16분주가 제대로 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

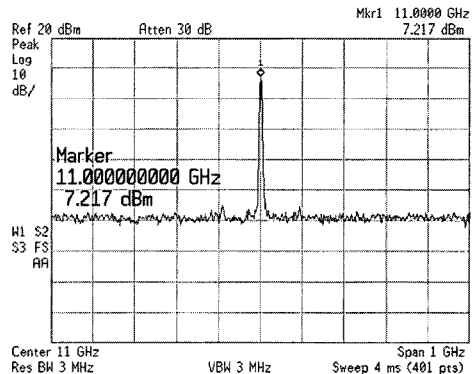


Fig. 4 Measured frequency spectrum of VCO output signal when N=6875

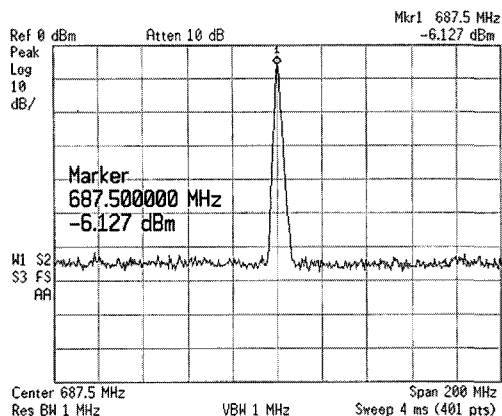


Fig. 5 Measured frequency spectrum of prescaler output signal when N=6875

또한 제어 신호에 따라 제작된 주파수 합성기의 출력 주파수 변화가 선형적으로 일어나는지를 관측하였다. 먼저 Fig. 6에 PLL 회로를 사용하지 않고 VCO 그대로 FMCW 레이더의 신호원으로 사용하는 경우의 비선형성을 조사하기 위해 본 논문에서 사용한 VCO 소자 VTO-8951의 제어전압변화에 따른 출력 주파수 변화를 나타내었다. Fig. 6에서 점선은 주파수의 선형성을 체크를 위해 표시한 직선으로, 사용한 VCO 소자의 주파수 특성은 비선형인 것을 알 수 있다. 이러한 비선형적 특성은 온도에 따라서도 많이 달라지는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다.

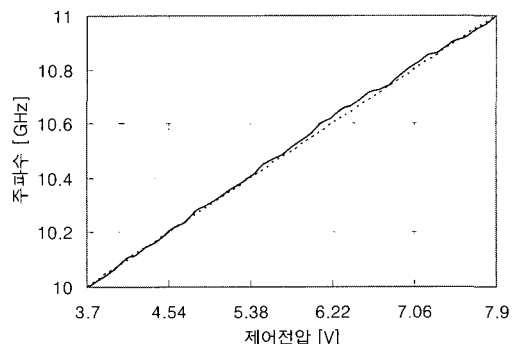


Fig. 6 Output frequency of VCO without PLL versus the tuning voltage

이러한 비선형 특성을 보상하기 위해 본 논문에서 제작한 주파수 합성기의 출력 신호의 주파수 변화를

Fig. 7에 나타내었다. N 분주비의 값이 6250 ~ 6875로 연속적으로 변할 때 VCO의 출력 주파수를 측정할 결과이다. Fig. 7의 경우에 주파수가 선형적으로 변하는 것을 볼 수 있다.

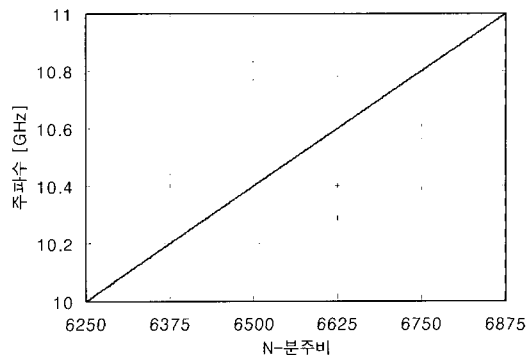


Fig. 7 Output frequency of VCO with PLL versus N-division ratio

Fig. 8에 제작한 주파수합성기의 11 GHz 출력 신호의 위상잡음을 측정하여 나타내었다. 11 GHz의 100 KHz offset 주파수에서 위상잡음이 -80.62 dBc/Hz 로 나타났다.

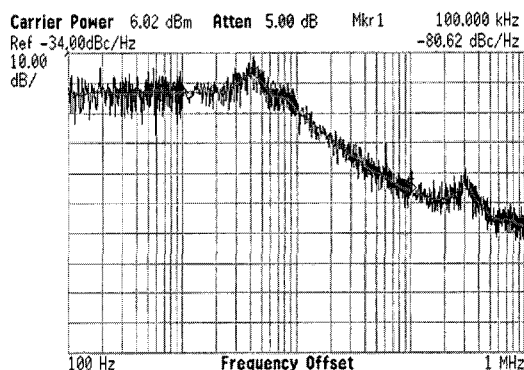


Fig. 8 Phase noise characteristic of the developed frequency synthesizer

Fig. 9에 제작한 주파수합성기의 N 분주비의 값이 6250 ~ 6875로 연속적으로 변할 때 VCO의 출력 주파수의 스펙트럼을 측정할 결과를 나타내었다. 10 GHz ~ 11 GHz 대역에 걸쳐 출력 신호의 전력이 10.1 dBm ~ 7.2 dBm 로 측정되었다. 이러한

출력 신호의 전력 차이는 FMCW 레이더의 분해능에는 영향을 미치지 않는다.

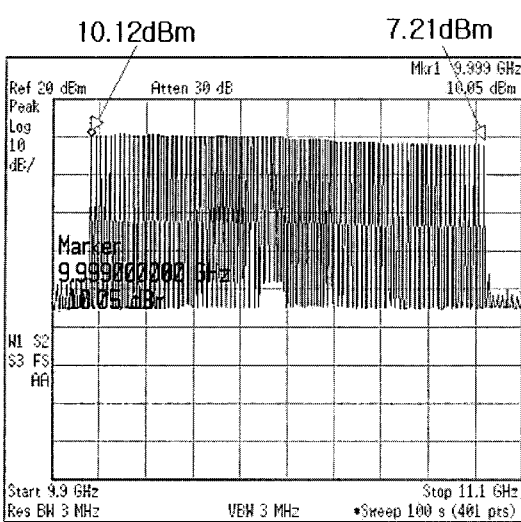


Fig. 9 Measured frequency spectrum of the developed frequency synthesizer when N changes continuously from 6250 to 6875

4. 결 론

본 논문에서는 선박의 화물 탱크에서 레벨센서로 사용되는 FMCW 레이더의 신호원을 제작하였다. 고 분해능을 얻기 위해 시간에 따라 주파수 변화가 선형적으로 변하는 신호원을 PLL을 이용하여 간접 주파수 합성 방식으로 구현하였다. 제작된 주파수 합성기는 X 밴드의 주파수 신호를 프리스케일러를 통해 16 분주하여 주파수를 낮추어 기준발진기와 위상 비교를 하도록 설계하였다.

제작된 주파수 합성기의 출력주파수는 10 GHz ~ 11 GHz 이며, 1 GHz의 대역폭에서 주파수변화가 선형적으로 변하는 것을 관측하였으며, 출력 신호 대역에 걸쳐 전력이 7.2 dBm 이상이고, 11 GHz에서 100 KHz offset 주파수의 위상잡음이 -80 dBc/Hz인 주파수 합성기를 제작하였다.

본 논문에서 제작된 주파수 합성기는 고 분해능을 갖는 FMCW 레이더 빔 방식의 화물선박용 탱크 레벨 센서에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] 박정동, 김완주, “단일 안테나를 사용한 W-대역 호모다인 FMCW 레이더의 누설신호에 의한 IF 잡음에 관한 연구”, 전자공학회지, 제 42권 TC 제 7 호, pp. 49-56, 2005.
- [2] Merrill I. Skilnik, Introduction to Radar System, Wiley-Interscience, McGraw-Hill, Inc, 1988.
- [3] <http://www.saab.tankradar.com>
- [4] V. Manassewitsch, Frequency Synthesizer Theory and Design, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- [5] J. A. Crawford, Frequency Synthesizer Design Handbook, Artech House, Boston, 1994.
- [6] Z. Galani, “An overview of frequency synthesizers for radar”, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-39, pp. 782-792, 1991.
- [7] 구영희, “UHF(435-440MHz) 대역에서 동작하는 PLL을 이용하는 주파수 합성기의 설계 및 제작”, 한국과학기술원 석사논문, 1992.

저 자 소 개



박동국 (朴東國)

1964년생, 1987년 부산대학교 전자공학과 졸업(학사), 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사), 2004년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사), 2004년~2006년 LG전자 선임 연구원, 2006년~현재 한국해양대학교 전파정보통신공학부.



이현수 (李炫樹)

1976년생, 2003년도 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업(학사), 2006년 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업(석사), 현재 한국단자공업(주) 정보통신사업본부 연구원.