

유량 측정을 위한 FMCW 레이더 파형 설계

이창기*

Design of FMCW radar waveform for flow measurement

Changki Lee*

*Engineer, Department of Radar Software, Hanwha Systems, Yongin, Gyeonggi-do, 17121 Korea

요 약

현재 상용화되어 있는 유량 측정 레이더 센서는 표면 유속을 이용하여 유량을 측정하는 방법을 사용한다. 이러한 방식으로는 표면 유속만으로 유량을 추정하는 것이기 때문에 단위 시간당 흐르는 물의 양을 정확하게 측정할 수 없다. 보다 정확한 측정을 위해서는 수위와 유속 정보 모두가 필요하며, 이에 따라 일부 상용 계측기는 수위와 유속을 각각 측정하는 두 개의 센서를 이용하여 유량을 산정하는 방식을 채택하고 있다. 본 논문에서는 하나의 FMCW 레이더 센서를 이용하여 수위와 유속을 동시에 측정할 수 있는 방법에 대하여 제안하고, 이를 위한 FMCW 레이더 송신 파형을 설계한다. 또한, 송신 파형을 기반으로 수신 신호를 모델링하여 수위 및 유속 측정 시 발생할 수 있는 문제점들에 대해 고찰하고자 한다.

ABSTRACT

A commercial flow measurement radar sensor estimates a quantity of flowed water using surface flow rate. In this way, the amount of water flowing per unit time cannot be measured accurately because of using an estimation result and it can't response environmental changes. For more accurate flow measurements we need width of waterway, water level and distance that water moved per unit time. Commonly two sensors are used to measure water level and flow rate. In this paper, we propose a method to simultaneously measure the water level and surface flow velocity using a single FMCW radar sensor and design the transmission waveform. In order to verify the waveform design, received signal is modelled based on transmission waveform. In addition, we consider phenomenons and problems that may occur in signal processing.

키워드: 주파수 변조 연속 파형, 레이더 시스템, 레이더 유량 측정, 레이더 신호처리, 줌-푸리에 고속 변환

Keywords: FMCW, Radar System, Radar Flow-meter, Radar Signal Processing, Zoom-FFT

Received 6 September 2019, Revised 17 September 2019, Accepted 2 October 2019

* Corresponding Author Changki Lee(E-mail:lcg901@hanwha.com, Tel:+82-31-8020-7939)

Engineer, Department of Radar Software, Hanwha Systems, Namsa-myun, Cheoin-gu, Yongin, Gyeonggi-do, 17121 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.1.83>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

수자원 관리에서 하천의 유량 관측은 용수 공급, 수질 관리, 댐 개발 등 수자원 계획을 결정하는데 필요한 아주 기본적인, 중요한 자료이다. 이러한 유량 측정의 가장 기본적인 방법은 하천의 폭, 수위와 유속을 측정하여 단위 시간당 흐르는 물의 양을 계산하는 것이다. 국내에서는 과거에 농·산업용 수로 및 하천의 유량을 측정하기 위해서 하천 바닥에 또는 수로의 측면에 초음파 센서를 설치함으로써 유량을 측정을 수행하는 방법이 적용되어왔다. 하지만, 수중에 센서를 설치하는 것이 어렵고, 토사 및 수중 식물 등에 의해 유지 보수 및 점검하는데도 상당한 어려움이 있다.

이러한 문제를 해결하고자 최근에는 수로 및 하천 등의 외부에서 표면의 수위 및 속도를 측정을 할 수 있는 비접촉 레이더 센서에 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 레이더 센서는 설치 뿐 만 아니라 정기적인 점검 등 유지 보수가 용이하다. 특히 홍수 시에도 기기망실의 위험성이 적고, 비교적 측정 시간이 짧기 때문에 급변하는 수위 및 유속 측정이 가능하다.[1]

하지만, 수위와 유속을 동시에 측정하기 위해서는 서로 간의 측정 방식 및 설치 방법 등이 다르기 때문에 수위를 측정하는 센서와 유속을 측정하는 센서가 각각 따로 있어야 한다. 이미 해외 시장에서는 비접촉 수위 측정기와 표면 유속 측정기를 하나의 패키지로 묶어서 각각의 장비 가격 대비 5배 이상의 가격이 책정되어 고가의 장비로 판매되고 있다. 통상 하나의 레이더 센서로 유량을 산정하는 경우, 표면의 유속을 측정하고 이에 대한 유량을 추정하던지 수위를 측정하고 이에 대한 유량을 추정하는 방식으로 진행되는데 이는 계절 및 기후 등의 영향으로 주위 환경이 바뀌기 때문에 시간이 지남에 따라 오차가 상당히 많이 발생하기 때문에 비교적 정밀한 유량 측정이 어렵다. 즉, 정확한 유량 측정을 위해서는 같은 시간에 측정된 수위와 유속에 대한 정보가 모두 필요하다.

일반적으로 수위 측정기로 사용되는 FMCW 방식의 레이더는 수직으로 설치하기 때문에 속도 성분을 추출할 수 없지만, 표면 유속 측정기와 유사하게 기울려 설치한다면 주파수 변조를 통해서 거리 정보뿐만 아니라 속도 정보를 동시에 추출할 수 있다. 또한, 주파수 변조 방식, 패턴을 어떻게 형성하느냐에 따라 정밀한 거리 또

는 정밀한 속도 등에 초점을 맞추어 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 각 주파수 변조 단계별로 측정된 경사 거리와 표면 유속 그리고 간단한 삼각함수 기법을 이용하면 하나의 레이더 장비로도 수위와 유속을 이용한 유량 산출이 가능하다.

본 논문에서는 해외에서 판매되고 있는 일반적인 레이더 수위계 및 레이더 표면 유속계의 사양을 이용하여, 동시에 수위와 표면의 유속을 측정하여 유량을 산정할 수 있는 레이더 시스템의 설계 사양을 도출하였다. 도출된 설계 사양을 만족하기 위한 FMCW 레이더 파형 설계 및 설계 시 고려해야 할 사항에 대하여 고찰하며, 송신 파형을 적절히 만들 수 있는 송·수신 단의 구조를 제안하였다. 또한, 제안된 레이더 송신 파형 및 송수신 단의 구조가 적절한 지에 대한 검증을 위하여 이에 대한 수신 신호를 모의 구현하여 그 성능 및 구현 가능성을 예측하였다.

II. 요구 및 설계 사양

일반적으로 해외에서 판매되고 있는 레이더 수위계와 표면 유속 측정기의 기본 모델들을 참조하여 유량 측정을 위한 FMCW 레이더의 사양을 설정하였다.[2] 표면 유속과 수위를 동시에 측정하는 모델의 사양이어서 개별 레이더 수위계보다 설치 높이가 낮지만 설치 높이의 경우, 안테나 크기에 따라 조절이 가능하므로 본 논문에서는 일반적인 혼 안테나를 사용했을 경우를 가정하여 레이더 유량계의 사양을 선정하였다.

Table. 1 Surface flow velocity & Level measurement radar requirements

Propagation technique	CW, FMCW
Operating frequency	24 GHz (K-band)
Installation height	1 ~ 15 m
Grazing angle range	40 ~ 60 °
Min, Max flow velocity	0.3 ~ 15 m/s
Velocity accuracy	±5 cm/s (±3% of reading)
Level accuracy	±3 mm (±3% of reading)
Minimum river width	5 m
3dB beamwidth	10 °
Measurement update interval	2 ~ 3 sec

표 1과 같은 요구 규격을 만족하기 위해서 레이다가 갖추어야 할 레이다의 사양을 도출해야 한다. 여기서 고려해야 할 부분은 크게 3가지로 볼 수 있다.

첫 번째로 설치 거리 범위 내 측정이 가능한가, 두 번째로 요구 속도 범위 내 측정이 가능한가, 세 번째로는 거리 및 속도 정확도를 만족할 수 있는가로 나누어 볼 수 있다. 고려 사항 첫 번째 항목으로 설치 거리 범위 내에서 측정이 가능하도록 레이다의 설계 사양을 결정해야 한다. 레이다의 설치 높이가 1 ~ 15m, 조향각도 범위는 40 ~ 60°, 빔 폭이 10° 이므로 최소로 만족해야 하는 레이다 측정 범위는 1.10 ~ 26.15m가 된다. 두 번째 고려 사항으로 요구 속도 범위 내 측정이 가능해야 한다. FMCW 레이다에서 표면 유속 측정은 상대 속도에 따른 도플러 주파수 편이를 관측함으로써 추출할 수 있다. 일반적으로 도플러 주파수를 추정하기 위하여 시간 영역의 수신 신호를 푸리에 변환하여 주파수 영역의 도플러 필터 बैं크를 구현한다. 여기서 추가적으로 고려해야 할 점은 FMCW 레이다이기 때문에 거리에 따른 Beat 주파수도 동시에 발생한다는 것이다. 따라서 최대 측정 거리에서의 상대 속도를 이용하여 최대 주파수 범위를 산정해야 한다. 최대 측정 거리에서 발생할 수 있는 주파수와 관측해야 하는 최저 속도에 상응하는 주파수는 수식 (1)과 같이 표현될 것이며, 이를 통해 발생 할 수 있는 최대 주파수 범위를 얻을 수 있다.

$$f_{\max} = \left(\frac{f_m}{T_m} \times \frac{2R_{meas}}{c} \right) - \frac{2V\cos\theta}{\lambda} \quad (1)$$

또한, 중요한 관심사 중 하나는 측정 정확도와 가장 밀접한 관계를 갖는 해상도이다. 해상도는 거리 해상도와 속도 해상도로 나누어 생각할 수 있다. FMCW 레이다에서의 거리 해상도는 수식 (2)에서와 같이 변조 대역폭에 의해서 결정 된다.

$$\delta f_{beat} = \frac{1}{T_m} = \left(\frac{f_m}{T_m} \times \frac{2\delta R_{meas}}{c} \right) \quad (2)$$

$$\delta R_{meas} = \frac{c}{2f_m}$$

거리 정확도를 ±3mm 로 추출하기 위해서는 최대한 거리 해상도를 작게 설정해야 하지만 Zoom FFT와 같은 신호처리를 통하여 거리 정확도는 거리 해상도의 약 10 배 정도로 개선되기 때문에 약 6cm 정도의 해상도를 설

정하는 것이 좋다. 하지만, 중심 주파수의 10% 정도의 대역폭을 선형 변조하는 것이 구현상 어렵기 때문에 7.5 cm 의 거리해상도에 해당하는 변조 대역폭 2GHz 를 선정하였다.

속도 측정에 대한 해상도는 이에 대응하는 도플러 스펙트럼의 해상도와 같기 때문에 시간 영역에서의 신호를 수신하는 관측 시간에 의하여 결정되며, 수식 (3)과 같이 표현 된다.

$$\delta f_{dop} = \frac{1}{T_m} = \frac{2\delta V\cos\theta}{\lambda} \quad (3)$$

$$\delta V = \frac{\lambda}{2\cos\theta T_m}$$

속도 측정의 경우 상대적으로 거리 측정 시 보다 더 낮은 주파수를 관측해야 한다. 일반적으로 수위 및 유속 측정계의 경우 요구되는 측정 주기가 수 초 수준으로 비교적 길기 때문에 관측 시간 또한 길게 설정할 수 있다. SNR 에 따라 차이는 있겠지만, 앞서 언급한 바와 같이 신호 처리를 이용하여 정확도를 높일 수 있으므로, 5cm/s 정도의 해상도를 갖는다면 ±5cm/s 의 정확도를 확보하는 데에 어려움이 없을 것으로 판단된다.

Table. 2 FMCW radar specification for waveform design

Sweep bandwidth	2 Ghz
Sweep interval	140 ms
Range resolution	7.5 cm
Measurement slant range	1 ~ 27 m
Dynamic range	≈ 55 dB
Baseband frequency bandwidth	±2.5 kHz (-1.9 ~ 2.5 kHz)
Observation interval	280 ms
Beat frequency accuracy	±4 Hz
Doppler frequency accuracy	±4.3 Hz
Sampling frequency	10 kHz
Quantization resolution	12 bits

이를 수식 (3)을 이용하여 계산하여 보면, 속도 측정을 위하여 필요한 측정 주기는 약 231 ms 정도가 된다. 표 2 는 위에서 언급된 3가지 항목을 토대로 FMCW 레이다 송신 파형 설계 사양에 대하여 나타내었다.

III. 송신 파형 및 처리 알고리즘

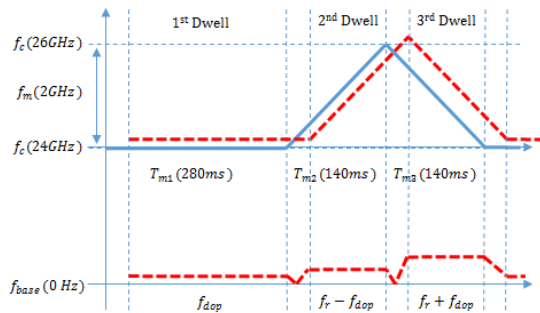


Fig. 1 FMCW radar waveform operational concept

송신 파형에 대한 운용 개념을 그림 1에 도시하였다. 송신 파형은 3가지 기울기를 이용하도록 설계하였고, 이 3가지 송신 파형이 한 세트르 운용된다. 즉, 560ms 마다 한 번의 유량을 산출할 수 있다. FMCW 레이다는 주파수 변조를 통해서 거리 및 속도 정보를 얻을 수 있는데 첫 번째 단계에서는 주파수 변조를 하지 않기 때문에 속도 성분만 획득이 가능하다. 이후 첫 번째 단계에서 얻어진 속도 정보를 이용하여 두 번째, 세 번째에 적용하여 거리에 따른 비트 주파수를 추출해 낼 수 있다. 실제로 두 번째, 세 번째 단계만으로도 거리 및 속도를 추출할 수 있으나, 추출된 표적의 개수가 2개 이상일 경우에 그 해를 구하기 어려워진다. 또한, 두 번째와 세 번째에서 얻어지는 정보는 하나의 값에 거리와 속도 정보가 모두 포함되어 있기 때문에 둘 중 하나의 값이라도 잘 못 산출되면, 다른 하나의 정보도 왜곡 되는 문제가 있다. 따라서, 첫 번째 주파수 변조가 없는 구간에서 약 280ms 동안의 관측을 통해 데이터를 수집하고, 이를 통해 속도 성분을 정확하게 뽑아낸 후 이후 단계에 적용하는 방법을 제안한다.

추출된 정보를 이용하여 유량을 산출하는 방법은 그림 2에 나타내었다. 관개수로의 폭과 수로 바닥으로부터 계측기의 설치 높이 정보를 입력해 주면 표면의 유속과 수위를 측정하여 유량을 산정하게 된다.

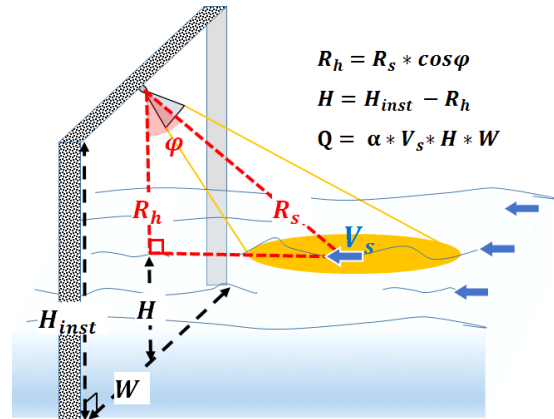


Fig. 2 Method for calculating amount of flowing water in irrigation canal

앞서 언급한 세 구간 모두 송신 파형의 변조량 및 주기만 다를 뿐 신호를 처리하는 방식은 동일하다. 송신 신호와 수신 신호가 혼합기를 거쳐 차 신호를 출력하게 되고, 이를 고속 푸리에 변환(FFT)을 통해 주파수 영역으로 변환하여 분석한다. 여기에 정밀한 측정을 위해 높은 주파수 해상도가 요구되기 때문에 이미 잘 알려져 있는 Zoom FFT 알고리즘을 적용하였다. 이에 대한 처리 알고리즘에 대한 순서도를 아래 그림 3에 나타내었다.

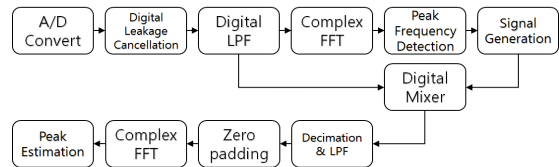


Fig. 3 Block diagram of digital signal processing

Zoom FFT를 이용하면, 보간을 통하여 특정 주파수 대역이 확장된 스펙트럼을 얻을 수 있기 때문에 침투 주파수 추정을 더 정밀하게 할 수 있다.[3] 각 구간 별로 얻어진 차 주파수 성분은 아래 수식(4)와 같이 환산되어 거리 및 속도 성분으로 분리 된다. 표면에 대한 반사 신호가 하나의 침투점으로 반사되어야 하나, 실제 환경에서는 하나의 침투점만 발생하는 보장이 없기 때문에 두 개 이상의 침투점이 발생하였을 때, 구간 2와 구간 3에서 얻어진 거리가 동일한 침투점들을 서로 연관하여 모호성을 제거 한 후 거리를 판단하게 된다.

$$\begin{aligned}
 \text{구간 1 : } f_{dop} & \quad V_S = \frac{\lambda f_{dop}}{2\cos\phi} & (4) \\
 \text{구간 2 : } f_{beat1} + f_{dop} = f_{r1} & \quad R_S = \frac{c T_{m2} f_{r1}}{2f_m} \\
 \text{구간 3 : } f_{beat2} - f_{dop} = f_{r2} & \quad R_S = -\frac{c T_{m2} f_{r2}}{2f_m}
 \end{aligned}$$

IV. 설계 시 고려 사항

설계 시 고려해야 할 사항 중 하나로, 표면의 유속 측정 시 표면의 잔물결 즉, 너울과 전자파의 입사각도에 의해서 반사되어 돌아오는 신호의 강도가 달라지게 된다. 이는 브래그 파장에 따른 공진 효과이며, 실제 하천의 표면 유속을 측정할 때 발생되어 연구된 바 있다.[4] 표면 유속의 측정에서 브래그 파장에 따라 마이크로 웨이브 파장과 공진 조건이 달라지게 된다. 마이크로 웨이브 파장은 그림 4에서 볼 수 있듯이 반사되어 돌아가는 파장과 동위상이 되었을 때 가장 큰 신호가 수신되게 된다.

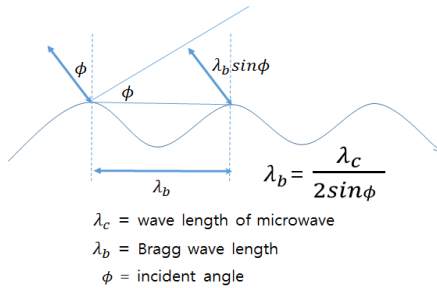


Fig. 4 Bragg wavelength

여기서 브래그 파장은 조향 각도에 따라 달라지는 것을 알 수 있다. 브래그 파장은 위상 속도에 영향을 미치게 되는데 잘 알려진 위상 속도는 수식 (5)으로 나타낼 수 있다.

$$V_{Phase} = \sqrt{\frac{g}{k_b} + \frac{\tau}{\rho} k_b} \quad (5)$$

g는 중력가속도로 9.81 m/s²이며, τ는 물의 표면 장력으로 일반적인 물에 대해 0.074 N/m 이다. 또한 ρ는 물의 밀도로 4°에서 1000 kg/m³의 값을 나타낸다. 위에 제시된 값들은 물의 상태가 변하더라도 크게 바뀌지 않

때문에 거의 고정된 값으로 사용되며, 위상 속도를 결정짓는 가장 큰 요소는 파수 벡터(k_b)이다. 브래그 파장에 따른 파수 벡터는 $k_b = 2\pi/\lambda_b$ 로 나타나며, 수식 (5)를 이용하여 조향 각도에 따른 브래그 파장 및 위상 속도를 표 3에 나타내었다.

Table. 3 Bragg spectrum line at min.velocity(0.3m/s)

Grazing angle	40°	45°	50°	55°	60°
Bragg wavelength	0.81 cm	0.88 cm	0.97 cm	1.08 cm	1.24 cm
Phase velocity	±0.26 m/s	±0.26 m/s	±0.25 m/s	±0.24 m/s	±0.24 m/s
Doppler frequency (0.3 m/s)	69.54 Hz	63.47 Hz	56.99 Hz	50.23 Hz	43.28 Hz
	4.38 Hz	4.77 Hz	5.03 Hz	5.11 Hz	4.965 Hz

유속 측정 레이다 센서의 도플러 주파수는 수면에서 양쪽으로 동시에 진행되는 수면파의 위상속도에 의해 유속 방향에 따라 양 또는 음의 도플러 변이를 일으키게 된다. 따라서 유속 도플러 주파수를 중심으로 두 개의 Bragg 도플러 스펙트럼선이 존재하게 되며 아래의 수식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$f_{dop} = \frac{2(V \pm V_{Phase})\cos\theta}{\lambda_c} \quad (6)$$

V는 유속이며, Vp는 위상 속도, λc는 마이크로 웨이브 파장이다. 최저 탐지 유속 0.3 m/s에 해당하는 도플러 주파수를 표 3에 나타내었으며, 0.3m/s에 해당하는 도플러 주파수 변이가 위상 속도에 의해 4Hz 부근에 나타난다. 이는 반송파 주파수와 차가 수 Hz에 불과하기 때문에 송수신 간 누설 신호의 크기 및 위상 잡음에 대한 영향을 분석해야만 한다.

송수신 간 누설(Leakage)은 연속파 레이다의 고질적인 문제로 송신부의 강한 신호가 수신부로 유입되어 기저대역 신호에 포화 상태를 일으킨다. 또한 누설된 신호는 수신되는 신호에 비해 상당히 강하기 때문에 위상 잡음 특성이 좋다 하더라도 그 영향 인접한 도플러 주파수에 영향을 줄 수 있다. 송수신 간 누설의 가장 주된 부분은 안테나 연결부의 부정합에 의해 반사되어 되돌아오는 신호가 될 것이다. 이는 수신되는 전파의 진행 방향과 동일하기 때문에 서큘레이터의 격리도와 관계없이 유입되며 상당히 큰 누설 신호로 나타난다. 하지만, 송수신 단의 구조는 설계하여 제작한 경우 그 형태가 고정

되기 때문에 유입되는 신호 또한 유사하게 나타난다. 따라서 수신 신호를 측정하여 크기를 동일하게 하고, 위상을 180° 편이 시킨다면, 간단한 누설 상쇄 기법(Digital Leakage Cancellation)을 통해서 기저 대역으로 유입되는 누설의 영향을 줄일 수 있다.[5]

또한, 송수신부를 호모다인 구조로 설계 한다면, 유입되는 거리가 매우 짧고 송신 시 사용되었던 동일한 발진기가 사용되기 때문에 상관도가 매우 높다. 따라서 거리 상관 효과(Range Correlation Effect)에 의해서 위상 잡음에 대한 영향 또한 상당 부분 감쇄 시킬 수 있겠다.[6]

V. 구조 제안 및 모의 구현

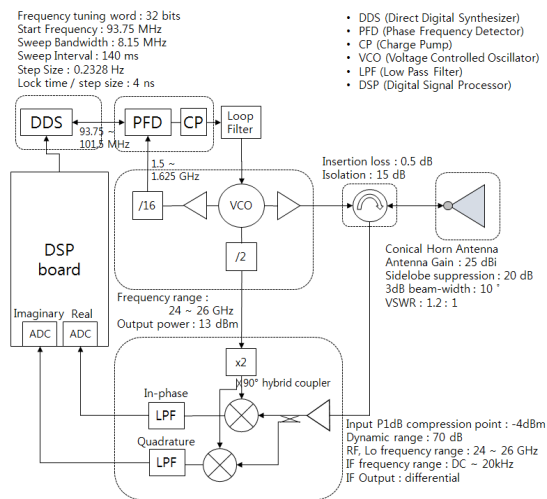


Fig. 5 proposed FMCW radar system block diagram

앞서 언급된 내용을 토대로 송수신부에 대한 구성도 및 각 부품의 사양을 그림 5에 제안하였다. 비교적 구현이 간단한 호모다인 구조로 기저대역으로 한번에 Down Convert 함으로써 발진기의 거리 상관 효과를 높이는 구조를 채택하였다. 또한, Direct Digital Synthesizer (DDS)를 참조 신호로 사용하는 Phased Locked Loop (PLL) 구조를 제안한다. 이와 같은 방법을 이용하면, 낮은 위상 잡음을 유지하면서 정확한 주파수로 빠른 시간 내에 주파수 변조가 가능한 장점이 있다. PLL에서는 고정된 분주비로 Voltage Controlled Oscillator(VCO)의 주파수를 조절하기 때문에 우수한 선형 주파수 변조가 가

능하다.[7]

설계의 타당성 검증을 위해 제안한 레이더 사양에 따라 특성 상황을 가정하였고, 수신되는 신호 모의를 진행하였다. 신호 모의에 사용된 파라미터는 아래 표 4와 같다.

Table. 4 Simulated Waveform Generation Parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Sampling Frequency	10 kHz	Operation Frequency	24 ~ 26 GHz
Signal to Leakage Power Ratio	13 dB	Leakage Path Length	15 cm
Signal Processing Loss	1.5 dB	Receiver & System Loss	1 dB
Antenna Gain	25 dBi	Grazing Angle	45 degree
Sweep Bandwidth 1	None	Sweep Interval 1	280 ms
Sweep Bandwidth 2	+ 2GHz	Sweep Interval 2	140 ms
Sweep Bandwidth 3	- 2GHz	Sweep Interval 3	140 ms
Surface Slant Range	10 m	Surface RCS	-5 dBsm
Surface Velocity	80 cm/s	Signal to Noise Ratio	25 dB
FFT Window	Hanning	Bragg wavelength	8.5 mm

거리와 속도 정보를 추출하기 위해서는 앞서 III. 장에서 언급된 처리 알고리즘에 따라 3 구간의 신호가 모두 처리 되어야만 한다. 따라서 신호 모의는 모두 3 구간으로 구성되어 진다. 우선 변조를 하지 않고 도플러 주파수를 추출하는 첫 번째 구간과 변조를 수행하여 표적의 모호성을 제거하고 거리를 추출하는 두 번째, 세 번째 구간이다. 본 논문에서의 모의 신호는 제안된 레이더 송수신 구조의 설계 사양 및 브래그 공진, VCO의 비선형성, 송수신 간의 누설에 대한 사항을 고려하여 모의를 진행하였다.

그림 6의 첫 번째 구간은 280ms 동안 변조가 없는 구간으로 모의 신호의 스펙트럼을 보면 제로 도플러 영역에 누설 신호가 모여 있는 것을 볼 수 있다. 이는 FMCW의 경우 거리에 따라 차 주파수가 분산되어 나타나지만, CW는 모두 DC 성분에 모이기 때문에 다른 구간 보다

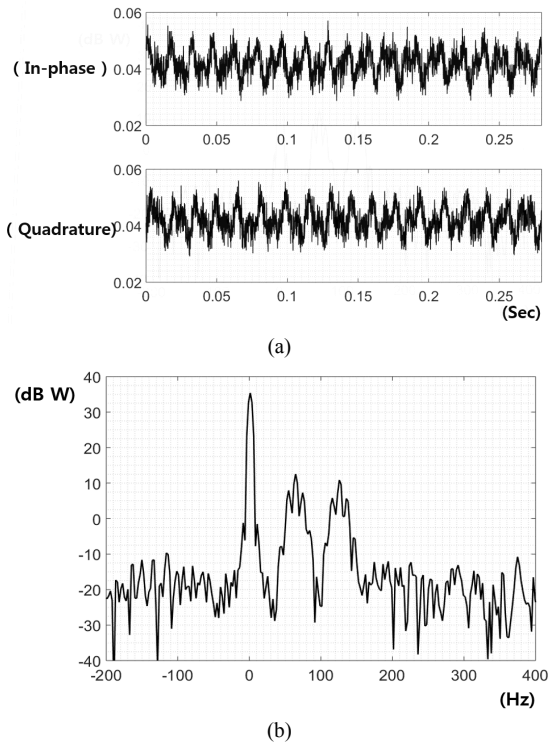


Fig. 6 (a) Time domain simulated signal for Interval 1st, (b) Simulated beat signal spectrum for Interval 1st

더 큰 누설 신호의 영향을 받는다. 우측으로 보이는 두 신호는 수 표면에 대한 신호로 브래그 공진에 의해서 기준 도플러를 중심으로 \pm 위상 속도 만큼 도플러가 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 스펙트럼의 해상도가 비교적 높고, 수 표면에 대한 브래그 파장이 일률적이지 않기 때문에 도플러 주파수를 중심으로 가우시안 형태로 분산되어 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 7에서 보이는 것처럼 두 번째 구간은 140 ms 동안 2GHz 변조를 하는 Up Sweep 구간이며, 거리에 따른 차 주파수와 도플러 주파수가 혼합되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 누설에 의한 차 주파수가 저주파 영역에 미세하게나마 분산되기 때문에 누설의 크기 낮고 퍼져있는 것을 확인할 수 있다. 역시 도플러 주파수의 영향이 있기 때문에 브래그 공진에 대한 영향이 있으며, 추가적으로 VCO의 비선형성의 영향으로 인하여 스펙트럼이 더 분산된 것을 확인할 수 있다.

세 번째 구간은 아래 그림 8(a)와 (b)에 도시 하였으며, 140 ms 동안 2GHz 만큼 Down Sweep 하는 구간이

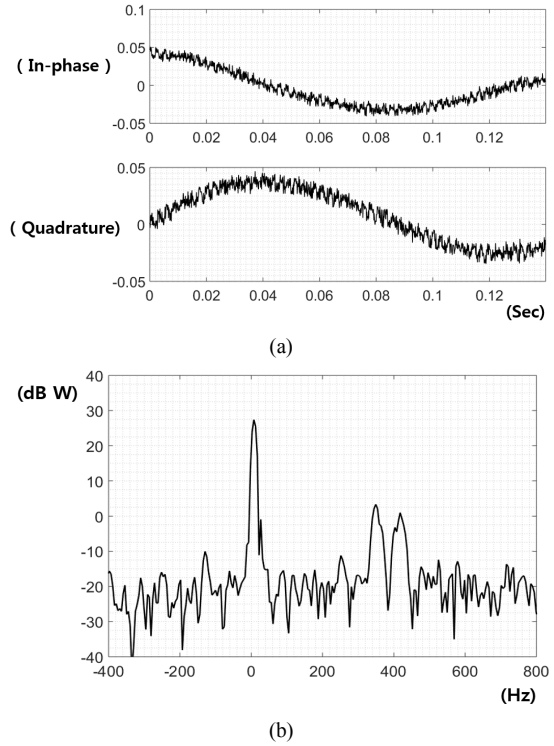


Fig. 7 (a) Time domain simulated signal for Interval 2nd, (b) Simulated beat signal spectrum for Interval 2nd

다. 이론적으로는 떨어져 있는 거리에 따른 차 주파수를 기준으로 두 번째 구간의 그림과 대칭으로 나타나야 한다. 그림 8(a) Quadrature 를 그림 7(a) 그림과 비교 하였을 때, 위상은 반대이고, 주파수가 동일한 것으로 보이므로, 방향은 반대이며 값은 동일한 주파수임을 예측할 수 있다. 그림 8에 도시된 그림을 통하여 Down Sweep 구간 역시 앞서 언급된 레이더 설계 사양과 누설, VCO의 비선형성, 브래그 스펙트럼 라인 등이 반영되어 있는 것을 확인할 수 있다.

모의 구현된 신호를 통하여 안테나의 이득, 반사 손실, 각 소자의 삽입 손실, 시스템의 Dynamic range 및 잡음 전력, 송신 전력, 송신 파형의 제어 방법, 송수신 간의 누설 등과 같은 설계 사양이 적절한 지 확인할 수 있었고, 차 주파수 성분에 가우시안 분포를 갖는 오차를 추가하여 VCO의 비선형 특성에 대해 모의 하였으며, 수면의 잔물결과 마이크로파의 공진에 의해 발생하는 브래그 스펙트럼 라인에 대해서도 모의를 수행하였다.

이와 같이 시간 영역의 모의 신호 및 스펙트럼 신호들

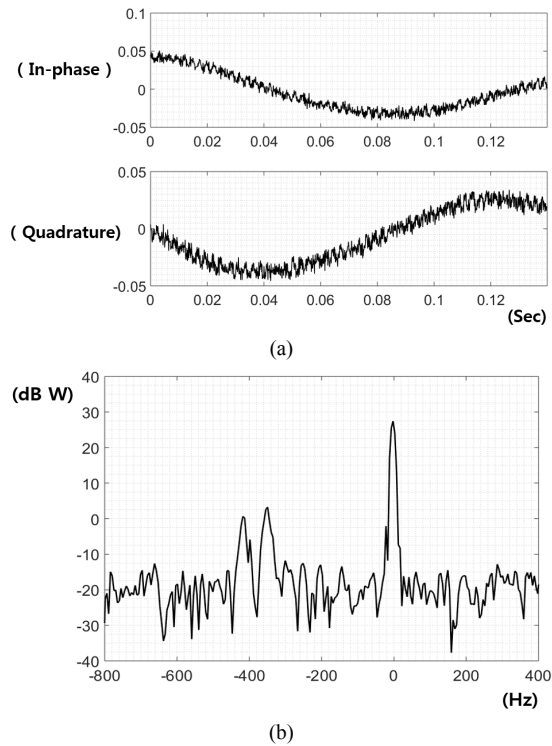


Fig. 8 (a) Time domain simulated signal for Interval 3rd, (b) Simulated beat signal spectrum for Interval 3rd

은 설계된 시스템의 성능을 추정할 수 있으며, 다양한 신호 처리 알고리즘에 대한 성능을 비교하거나 검증하는 데에 사용이 가능할 것이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 하나의 FMCW 레이더 센서를 이용하여 수위와 표면 유속을 동시에 측정할 수 있는 방법에 대해서 제안하고, 이를 통해 비교적 정밀하게 유량을 측정할 수 있는 레이더의 송신 파형을 설계하였다. 요구된 송신 파형을 생성 및 처리할 수 있는 송수신 단의 구조를 제안하였으며, 브래그 공진, 누설의 영향, VCO의 비선형성, 위상 잡음의 영향 등 추가적인 설계 고려 사항에 대해 고찰하였다. 또한, 제안된 레이더 송신 파형 및 송수신 단의 구조가 적절한 지에 대한 검증을 위하여 설계된 내용을 바탕으로 수신된 신호를 모의 구현하였다. 이를 통해 간단하게나마 설계된 레이더 시스템의 성능

을 추정할 수 있었으며, 다양한 신호 처리 알고리즘에 대한 성능 비교 및 검증이 가능한 기반을 마련하였다.

REFERENCES

- [1] D. S. Kim, S. K. Yang, and W. Y. Jung, "Error Analysis for Electromagnetic Surface Velocity and Discharge Measurement in Rapid Mountain Stream Flow," *Journal of Environmental Science International*, 23(4), pp. 543-552, Apr. 2014.
- [2] Y. S. Kim, N. I. Won, J. W. Noh, and W. C. Park, "Development of High-performance Microwave Water Surface Current Meter for General Use to Extend the Applicable Velocity Range of Microwave Water Surface Current Meter on River Discharge Measurements," *Journal of Korea Water Resour. Assoc.* vol. 48, no. 8, pp. 613-623, Aug. 2015.
- [3] S. Nuwan, and W. H. Kim, "Design and Performance Analysis of Zoom-FFT Based FMCW Radar," *Journal of Korea Society of Communication and Space Technology*, K9-2-8, pp. 38-44, May. 2015.
- [4] J. G. Lee, "A Study on Estimation of Doppler Frequency in a Current Velocity Measurement Radar," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 17, no. 7, pp. 1551-1557, Jul. 2013.
- [5] J. A. Park, and S. C. Song, "Leakage Signal Canceller and Adaptive Algorithm in Millimeter-Wave Seeker," *THE Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 30(1), pp. 88-94, Jan. 2019.
- [6] B. J. Jang, J. G. Yook, W. Na, and M. Q. Lee, "Noise Analysis and Measurement for a CW Bio-Radar System for Non-Contact Measurement of Heart and Respiration Rate," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 19(9), pp. 1010-1019, Sep. 2008.
- [7] D. S. Kim, H. S. Lee, J. P. Kim, and S. J. Kim, "Design and Modeling of a DDS Driven Offset PLL with DAC," *Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, vol. 12, no.5, pp. 1-9, Dec. 2012.



이창기(Changki Lee)

2011년 2월 인천대학교 정보통신공학과 공학사
 2014년 2월 인천대학교 정보통신공학과 공학석사
 2013년 5월 ~ 2016년 5월 아이에스테크놀로지
 전임연구원
 2016년 8월 ~ 현재 한화시스템 선임연구원
 ※관심분야: 레이더 신호처리, 레이더 시스템
 설계, 실시간 신호 처리