
협대역 FMCW 레이더를 이용한 고해상도 레벨게이지

엄승현* · 오우진**

High Resolution FMCW Level Gauge with Narrowband FMCW Radar

Soung-Hyun Eum* · Woojin Oh**

이 논문은 금오공과대학교 연구년제에 의하여 연구된 실적물임

요약

FMCW 레이더 방식의 레벨게이지는 비 접촉성, 원거리 계측과 다양한 형상으로 구현이 가능한 장점 때문에 많은 연구와 개발이 되어왔으나 cm급의 고 해상도를 얻기 위해서는 GHz의 넓은 대역폭이 필요한 단점이 있다. 본 논문에서는 협대역 시스템으로 광대역 성능을 얻을 수 있는 톱니파 형태의 송신 파형을 제안하였다. 이 방식은 STFT(Short-time fourier transform)로 짧은 구간으로 나누어 처리하고 단일 정현파의 주파수 추정 알고리즘으로 해상도를 개선하고 있으며 실험을 통하여 300MHz의 FMCW 레이더에서 8배까지 거리해상도가 개선되는 것을 보였다.

ABSTRACT

Level Gauge using FMCW Radar is widely used and researched in many areas because of contactless, long range and flexibility. However FMCW level gauge requires wideband RF bandwidth for archiving high resolution of cm grade. In this paper we propose a new tx sawtooth waveform and processing algorithm with narrowband RF for wideband performance. The proposed method is based on STFT(Short-time fourier transform) and single sinusoidal carrier estimation method. From some experiments, we show that the resolution is improved upto 8 times with 300MHz FMCW radar.

키워드

FMCW 레이더, 레벨게이지, 고해상도, 협대역

Key word

FMCW radar, Level gauge, high resolution, narrowband

* 준회원 : 금오공과대학교 석사
** 정회원 : 금오공과대학교 (wjoh@kumoh.ac.kr)

접수일자 : 2012. 04. 03
심사완료일자 : 2012. 04. 09

I. 서 론

FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) 레이더는 거리와 속도를 동시에 측정할 수 있으면서도 구조가 간단하여 차량용 충돌방지 센서, 도로의 교통량 측정, 주변 감시 등의 분야에서 많은 연구와 상용화가 진행되고 있다. 또한 FMCW 레이더가 갖는 비 접촉성, 원거리 측정 성능으로 레벨게이지(level gauge)에 적용하는 연구도 활발히 진행되고 있다[1]-[3].

레벨게이지는 사일로, 저장용 탱크, 유조선, 지하 보관실 등과 같은 곳에서 오일, 곡물 등의 양을 측정하는 장치로써, 자석 등과 같은 특수한 반사부표 방식, 초음파 또는 레이더를 활용하여 표면 반사 시간 방식, 내용물의 정전용량 방식 등으로 분류할 수 있다. 먼저 부표방식은 튜브형태의 가이드관이 필요하여 수십 미터의 거리를 측정하기 위해서는 수평맞춤 오차, 부표 등의 노후화 문제가 있는 것으로 알려져 있다. 초음파 방식은 산란문제로 인하여 측정 거리가 10m내외로 제한되고 있으며, 정전 방식은 액상만 가능하고 탱크의 높이만큼 전극을 설치해야 하는 단점이 있다[4].

레이더 레벨게이지는 탱크의 모양에 상관없이 정밀하게 측정할 수 있고 기존의 탱크에 간단히 설치가 가능한 장점이 있으나 비교적 부피가 크고 가격이 비싼 단점이 있다. 그러나 FMCW방식의 레이더 센서는 구조가 간단하고 밀리미터파를 사용하므로 안테나를 소형화할 수 있어 레벨게이지용으로 적합하지만 해상도를 얻기 위해서는 넓은 대역폭이 요구되는 문제점이 있다.

본 논문에서는 레벨게이지에서 요구하는 고해상도를 협대역 FMCW 레이더로 구할 수 있는 방식을 제안한다. 이 방식은 저가의 협대역의 RF에 튜너파형의 FMCW 송신파형을 사용하여 8배의 대역폭을 갖는 광대역 시스템과 동일한 성능을 얻을 수 있음을 보였다.

본 논문의 구성은 II장에서 FMCW 레이더의 동작 원리를 간단히 소개하고, III장에서 레벨게이지에서 요구하는 고 해상도를 얻는 방안을 제안하였다. IV장에서는 제안된 방식을 기존의 300MHz 레이더 시스템에 적용하여 실험한 결과를 보이고, V장에서 결론을 맺는다.

II. 일반적인 FMCW 레이더

FMCW 레이더는 그림 1과 같이 주파수가 시간에 따라 선형적으로 변하는 FM 신호를 송신하고 수신된 반사파와 송신 주파수의 차에서 거리와 속도를 측정한다. 거리는 송수신 시간차가 주파수 차이로 나타나게 되며, 속도는 도플러 효과에 의한 주파수 편이로 구할 수 있다[1].

송신 신호 $u_p(t) = A_t \cos \varphi_p(t)$ 라 하면, 수신신호는 송신신호가 t_d 만큼 지연되고, 반사체의 특성에 따라 크기와 위상이 변화하므로 다음과 같이 적을 수 있다.

$$u_r = A_r \cos[\varphi_p(t - t_d) + \varphi_0] \quad (1)$$

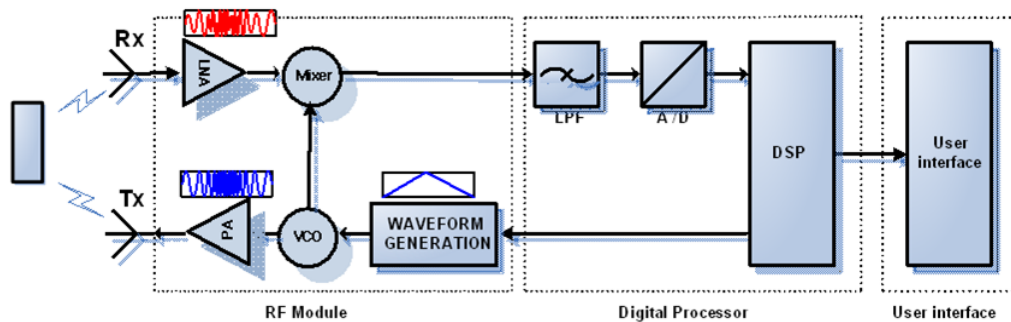


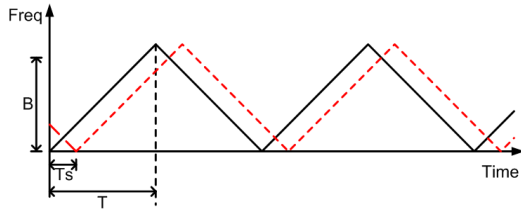
그림 1. FMCW 레이더 시스템 블록도
Fig. 1 Block diagram of FMCW Radar

Mixer에서 두 신호가 곱해지고 저역통과 필터를 통과하면 합 성분은 제거되고 차 성분만 남는다.

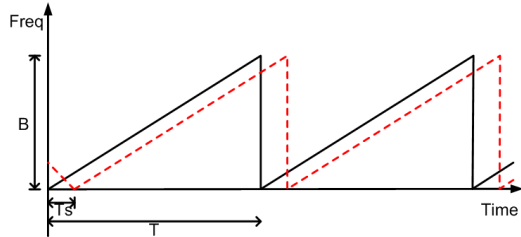
$$u_m(t) = A_m \cos[\varphi_p(t) - \varphi_p(t - t_d) + \varphi_0] + C \quad (2)$$

송신 주파수 $\varphi_p(t)$ 가 그림 2(a)와 같이 시간에 따라 선형적으로 변하는 경우, 수신 신호는 점선과 같이 지연되어 수신되므로 식 (2)는 거리 정보를 갖고 있는 비트주파수(beat frequency, f_b)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_m(t) &= A_m \cos(\varphi_p t_d t + \varphi_0) + C \\ &= A_m \cos(f_b t + \varphi_0) + C \end{aligned} \quad (3)$$



(a)



(b)

그림 2. 일반적인 FMCW 송신 주파수 파형
(a) 삼각파 (b) 톱니파

Fig. 2 Conventional FMCW Tx waveform
(a) Triangular pulse (b) Sawtooth pulse

일반적인 FMCW 레이더는 그림 2(a)와 같은 삼각파를 사용하며, 거리 및 속도와 비트주파수의 관계는 다음과 같다. (상대속도 > 0 인 경우)

$$\text{상승(up)구간: } f_{b,up} = f_r + f_d$$

$$\text{하강(down)구간: } f_{b,down} = f_r - f_d$$

$$\text{거리주파수: } f_r = \frac{f_{b,up} + f_{b,down}}{2}$$

$$\text{속도 주파수: } f_d = \frac{f_{b,up} - f_{b,down}}{2}$$

여기서 f_r 은 거리 주파수 (ranging frequency)이며, f_d 는 도플러의 의한 주파수 편이 값이다. 속도가 0인 경우에는 $f_b = f_r$ 이며, 상승과 하강 구간이 동일한 값을 가지므로 그림 2(b)와 같이 톱니파를 사용할 수 있다.

거리에 의한 지연 시간 τ 로부터 비트주파수와 관계를 알 수 있다.

$$R = \frac{c T f_b}{2B} \quad (4)$$

여기서 c 는 광속, T 는 각 구간의 폭이며, B 는 T 시간 동안 변화하는 대역폭이다.

대부분의 FMCW 레이더 신호처리부는 디지털로 구현되어 샘플링, FFT 등의 과정을 수행하므로 T 와 f_b 는 상호 연관된 파라미터가 된다. 즉 FFT의 주파수 해상도가 f_s / N_{FFT} 일 때, zero-padding 없이 온전한 N_{FFT} 개의 데이터를 얻기 위해서는 N_{FFT} / f_s 의 시간이 필요하므로 최적의 거리해상도는 식 (4)에서 T 와 f_b 가 상쇄되어 다음과 같이 정해진다[2].

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (5)$$

이때 zero-padding을 제외한 것은 주파수 해상도, 즉 서로 다른 두 신호를 구분할 수 있는 분해능이 결보기의 N_{FFT} 와 관계없이 유효한 데이터 길이에 의존하기 때문이다[5].

동일한 대역폭 B 를 갖고 있는 시스템에서 얻을 수 있는 최대 해상도는 항상 일정하다는 점이며, 레벨게이지에서 요구하는 1cm급 해상도를 얻으려면 15GHz 이상의 대역폭이 필요하다는 점이다.

다음 장에서는 선형의 초 광대역 FMCW 레이더를 사용하지 않고 고해상도를 얻을 수 있는 방법을 제안하겠다.

III. 레벨게이지용 FMCW 레이더

FMCW 레이더에서 거리만 측정하는 경우 상승구간 또는 하강구간만 있는 톱니파형을 사용할 수 있다. 만약 톱니파형으로 넓은 대역폭 B 를 한번에 상승하지 않고 그림 3(a)와 같이 B/N_s 의 협대역에서 변화한다고 가정해보자. 즉, N_s 개의 협대역 송신파형으로 구성된 칩(chirp)신호를 사용하면, 수신된 비트주파수는 그림 3(b)와 같이 될 것이다. 이 비트주파수 f_b 는 광대역을 사용했을 때와 동일한 값이며, 다만 송신 파형이 주파수 천이되는 지점에서만 B/N_s 의 주파수성분이 나타난다는 점이 다르다. 이 신호에서 천이 부분을 제거하고, 나머지 구간에서 f_b 를 구하면 광대역 B 를 사용하는 것과 동일한 효과를 얻을 수 있을 것이다.

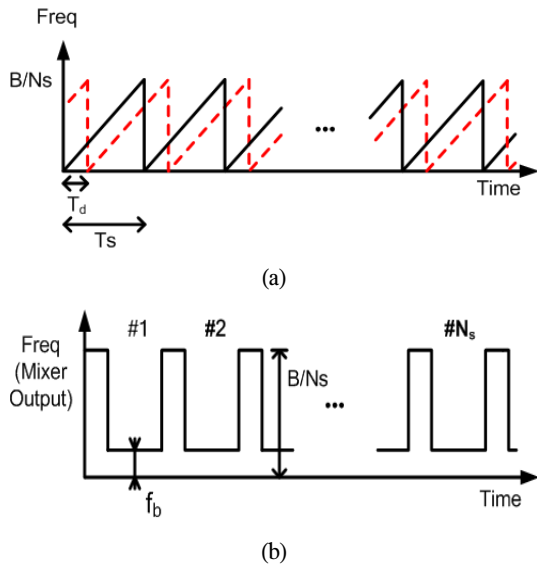


그림 3. (a) 제안된 FMCW 송신 주파수 파형과 (b) 수신된 비트주파수
 Fig. 3 (a) Proposed FMCW Tx waveform and (b) the received beat frequency

제안된 방식에서 주파수 천이 위치마다 고주파 성분이 나타나지만 저역통과 필터로 충분히 제거가 가능하다. 일반적인 FMCW 레이더의 비트주파수는 수백 KHz 이하이며, 고주파 신호는 수백 MHz 이상이기 때문이다.

그림 1에서 보인 바와 같이 수신신호는 믹서를 통과한 후 ADC 앞에서 저역통과 필터링이 되고 있다. 이때의 차단 주파수는 통상 표본 주파수에 따라 결정되며, 본 논문에서 사용한 시스템에서는 1MHz를 사용하고 있다. 이 고주파 성분은 필터에 의해 제거되겠지만, 주기 T 마다 반복적으로 소거되는 현상이 나타날 것이다. 즉 시간 영역에서 창 함수 $h_d(t)$ 가 곱해진 것과 동일한 영향을 줄 것이다.

$$h_d(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_d \\ 1 & t_d < t \leq T \end{cases} \quad (6)$$

여기서 t_d 는 반사체와의 거리에 따른 지연이며, 레벨게이지에서 사용하는 최대거리인 30m는 약 0.1us이다.

비트주파수를 구하기 위하여 전체 수신신호에 대하여 푸리에 변환을 적용할 경우에 $h_d(t)$ 에 영향을 받을 것이다. 레벨게이지에서는 수신된 신호가 일정 시간동안 동일한 비트 주파수를 갖고 있으며, 규칙적으로 고주파 성분이 나타나므로 주기 T 에 대하여 STFT(Short-Time Fourier Transform)을 적용해보자.

$$STFT\{x(t)\} \equiv X(w, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau)e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

여기서 $w(t)$ 는 해밍윈도우(hamming window)와 같은 창 함수이다.

STFT는 음성 신호처리에서 시변하는 주파수, 즉 피치(pitch), 위상 등을 추정하기 위해 많이 사용되며, 관찰 구간 $w(t)$ 의 지속 시간과 주파수 해상도가 서로 반비례 관계를 갖고 있는 특징이 있다. FMCW 레이더는 주기 T 와 거리에 의한 t_d 가 이미 결정되어 있다는 점이 다르며, 각 STFT 구간에서 얻어진 주파수 해상도는 광대역 B 를 사용한 것보다 약 $1/N_s$ 로 저하될 것이다.

STFT에서 주파수 해상도를 개선하는 여러 가지 방법 중에서 본 연구와 가장 유사한 단일 정현파 신호의 주파수 파라미터를 추정기법을 적용하였다. 레벨게이지용 FMCW 레이더는 탱크 등에 밀폐되어 설치되므로 다른 간섭원이 거의 없고, 단일 주파수가 강하게 수신되며 SNR이 10dB 이상이므로 구현이 간단한 위상기반의 미

분을 이용한 주파수 추정 방식을 선택하였다[6].

이 방식은 먼저 첫 번째 STFT로 초기 주파수 값을 결정하고, 각 STFT 구간에서 위상의 시간 미분 값을 추정하여 계속 갱신하게 된다.

$$w_i = w_{i-1} + \Delta w_i$$

$$\Delta w_i = -\frac{1}{2\pi} \text{Im} \left\{ \frac{X_{i,dw}(w, \tau)}{X_i(w, \tau)} \right\}$$

여기서 $X_i(w, \tau)$ 는 i 번째 STFT이며, $X_{i,dw}(w, \tau)$ 는 식 (7)의 STFT에서 $w(t)$ 대신에 $\frac{dw(t)}{dt}$ 로 STFT를 구하는 것이다. 이러한 과정을 그림 4에 보인 바와 같이 N_s 개의 STFT 구간에 대하여 반복적으로 수행하여 주파수 성분을 추정하게 된다.

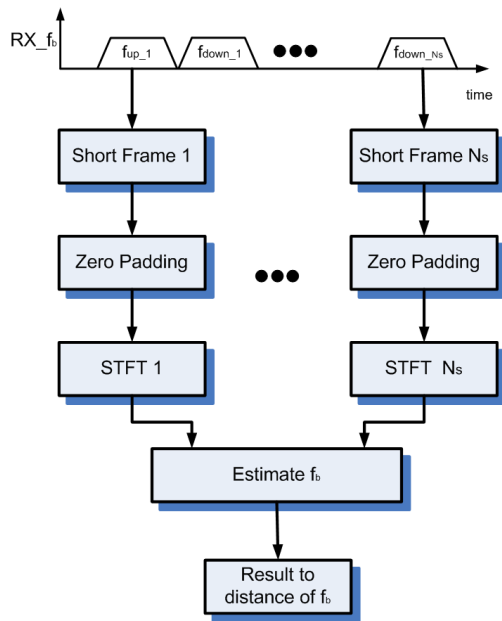


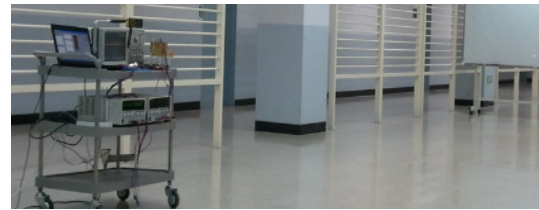
그림 4. 제안된 STFT 방식의 주파수 추정 알고리즘
Fig. 4 Proposed algorithm for frequency estimation based on STFT

IV. 파라미터 설계 및 실험

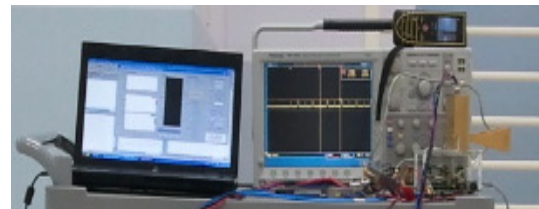
본 논문에서 사용된 FMCW 레이더는 차량용 레이더로 개발된 것으로 대역폭은 300MHz이다[2]. 제안된 광대역 FMCW 거리 측정 알고리즘의 검증과 비교를 위해 $B/N_s=300\text{MHz}$, $N_{FFT}=8192$, $fs=3\text{MHz}$, 광대역폭 B에서 $T=1\text{ms}$ 가 되도록 표 1과 같이 정하고 그림 5와 같이 실내 환경에서 실험하였다. ΔR 은 식 (4)에서 단위 FFT 인덱스에 대한 거리를 계산한 것이다. 실험에서 실제 거리 측정은 1mm 정밀도를 갖는 라이카의 레이저 거리 측정기로 확인하였다.

표 1. 실험 파라미터
Table 1. Experimental Parameter

N_s	T_s (ms)	유효대역폭 (MHz)	ΔR (m, 이론값)
1	5	300	0.916
2	2.5	600	0.458
4	1.25	1,200	0.223
8	0.625	2,400	0.114



(a)



(b)

그림 5 (a) 실험구성 (b) 시스템 형상
Fig. 5 (a) Test Configuration (b) board

$N_s=8$ 인 경우의 수신 신호는 그림 6과 같으며, 주파수 천이기가 나타나는 지점에 원하지 않는 신호인 급격한 침두치가 나타나고 있다. 이는 H/W 구현에 따른 오프셋 문제이며 STFT 계산에 포함되지 않았다.

표 2에 10m 거리에 대한 실험 결과를 보였으며, N_s 이 2보다 작은 경우에는 주파수 해상도인 ΔR 에 의해 결정된 값이 그대로 나타나고 있다. 이는 STFT가 2개만 존재하기 때문에 나타나는 문제이다. $N=8$ 인 경우에는 주파수 추정 알고리즘에 의해 결과가 ΔR 에 의한 값 10.03보다 개선된 결과를 보이고 있다. N_s 가 커지면 반복 횟수가 증가하여 해상도가 개선되지만 너무 큰 경우에는 오히려 유효 데이터 길이가 짧아져 성능에 문제가 있을 것으로 예상된다.

실험에 사용된 시스템의 한계로 인하여 N_s 를 8까지만 적용했지만 제안된 알고리즘의 성능을 확인할 수 있었다. 현재 레벨게이지용의 2GHz 대역폭을 갖는 2차 버전의 보드를 개발 중에 있으며, 향후에 제안된 알고리즘을 명확히 확인할 수 있을 것이다.

표 2. 10m에서 실험결과
Table. 2 Test Result at 10m

N_s \ 거리	측정값	이론값
1	10.07	10.08
2	10.07	10.08
4	10.05	10.04
8	9.98	10.03

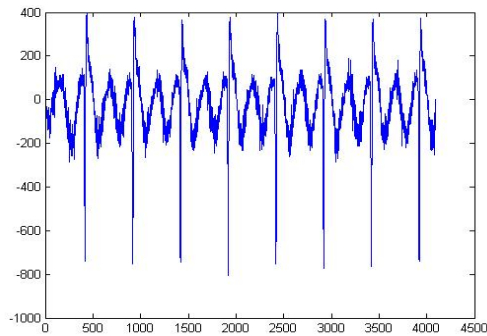


그림 6. 수신된 신호 ($N_s=8$)
Fig. 6 Received Signal

V. 결론

FMCW레이더를 레벨게이지에서 요구하는 거리 해상도를 얻기 위한 협대역 송신 방안을 제시하였다. 일반적인 FMCW 레이더에서는 거리해상도를 개선하기 위해서 송신주파수 대역을 광대역으로 해야 한다. 본 논문에서는 FMCW레이더의 송신파형을 톱니파 모양의 다중 칩으로 송신하는 경우에 STFT와 주파수 추정 알고리즘으로 8배까지 넓은 대역폭과 동일한 성능을 가질 수 있음을 보였다. 제안된 방식은 기존의 저가형 협대역 RF를 그대로 사용하면서 광대역의 성능을 얻을 수 있는 장점이 있다.

참고문헌

- [1] I. V. Komaro and S. M. Smolskiy, *Fundamentals of short-range FM radar*, Artech House, Norwood, MA, USA, 2003
- [2] 현유진, 오우진, 이종훈, “차량충돌 방지용 FMCW레이더의 sweep 선형성 개선을 위한 간단한 기법”, 한국전자과학회 논문지, pp.1109-1115, 2010, 10.
- [3] S. Ayhan, M. Pauli, T. Kayser, S. Scherr, and T. Zwick, “FMCW Radar System with Additional Phase Evaluation for High Accuracy Range Detection”, 8th European Radar Conference, pp117-120, 2011.
- [4] John G. Webster, *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, Chap 11, CRC press, 1999.
- [5] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*, 4th, Prentice-Hall, 2007.
- [6] S. Hainsworth and M. Macleod, “On sinusoidal parameter estimation”, 6th Int. conf. on digital audio effects, London, UK, 2003.

저자소개



오우진(Woojin Oh)

1989년 한양대학교
전자공학과 학사.
1991년 한국과학기술원
전자공학과 석사.

1996년 한국과학기술원 전자공학과 박사.
1996년 ~ 1998년, SK 텔레콤 선임연구원.
현재, 금오공과대학교 전자공학부 교수.
※ 관심분야: 레이더 신호처리, 통신 신호처리



엄승현(Soung-Hyun Eum)

2010년 금오공과대학교 학사
2012년 금오공과대학교 석사
아이디스 연구원

※ 관심분야: 신호처리, FPGA 및 DSP 설계