
Real FFT를 이용한 FMCW 레이더 신호처리

김민준* · 천이환** · 김주현**

FMCW RADAR SIGNAL PROCESS USING REAL FFT

Kim Min Joon* · Cheon I Hwan** · Kim Ju Hyun**

이 논문은 2005학년도 동의대학교 교내 연구비에 의해 연구 되었음 (2005AA160)

요 약

FMCW 레이더 신호처리를 위해 Real FFT를 적용하였다. Real FFT와 디지털신호처리를 이용하여 정확한 거리를 측정하기 위해서는 FMCW 레이더의 차 주파수 성분이 정확하고 주파수 분해능이 높아야 한다. 본 논문은 높은 분해능의 차 주파수 성분을 추출하기 위한 알고리즘을 구현하여 Matlab으로 시뮬레이션 하였다. 사용된 알고리즘은 Zoom FFT, Decimation, 디지털 저역통과 필터, Zero Padding 등을 이용하였으며, 시뮬레이션 결과 거리측정범위는 35m 이내이며, 정확도는 $\pm 5\text{mm}$ 였다.

ABSTRACT

In this paper, it is presented a Real FFT for the FMCW radar distance measurement with high resolution. The high distance resolution needs the measurement of the accurate beat frequency. To improve the distance resolution, zoom fft, decimation, digital low pass filter and zero padding method are used. The simulation results using the Matlab show $\pm 5\text{mm}$ of distance resolution and the measuring range is up to 35meter.

키워드

FMCW Radar, 유먼 레벨, 신호처리, FFT

I. 서 론

FMCW 레이더는 유류저장탱크, 비행 물체 고도측정, 차량 충돌 방지 등 여러 분야에서 사용되고 있다. 특히 선박 분야에서 유류저장탱크 레벨 게이지 시장이 점점 성장하고 있는 추세이나 유류저장탱크 레벨 측정에 이용되는 레이더는 전량 수입에 의존하고 있다.

본 논문에서는 유류저장탱크 레벨 측정에 FMCW 레이더를 적용하기 위하여 FMCW 레이더의 거리정보를 포함한 차 주파수의 정확한 주파수 성분 추출을 위해 Real FFT를 사용하였으며, Zoom FFT, Decimation, 디지털 저역통과 필터, zero padding 등의 디지털신호처리를 수행 하여 측정 거리의 정확도를 $\pm 5\text{mm}$ 로 구현 하였다. 이와 같은 알고리즘을 Matlab을 이용하여 시뮬레이션

* 동의대학교 정보통신공학과 교수
** 동의대학교 정보통신공학과

하였다. 최대측정 범위는 실제 선박의 유류저장탱크의 높이를 고려하여 35m로 설정하였다.

II. 본론

FMCW 레이더는 그림 1과 같이 주파수 삼각파 신호를 송신하며 목표물에서 반사되는 신호를 수신하게 된다. 따라서 송신신호와 수신신호 사이에는 거리에 따른 주파수 차이가 발생하며 이를 차 주파수라 한다. 차 주파수(F_R)는 식 (1)에서 알 수 있듯이 거리 정보를 포함하고 있다.

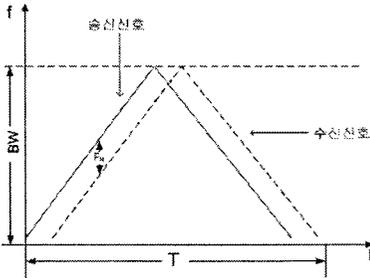


그림 1. FMCW 레이더 송수신 신호
Fig. 1. FMCW radar Instantaneous frequency of the radiated and reflected signals

$$R = \frac{cTF_R}{4BW} \quad (1)$$

여기서 BW 는 주파수 변조 폭, T 는 주파수 변조 주기, c 는 빛의 속도, F_R 은 차 주파수를 나타낸다. 식 (1)에 의하면 주파수 변조 폭과 변조 주기에 의해 측정 범위와 정확도가 결정된다.

그림 2는 FMCW 레이더의 블록도를 나타내었다. 전압제어발진기와 PLL을 이용하여 선형적인 FMCW 레이더의 송신신호를 발생하고, 안테나를 통해 목표물로 송신한다. 목표물의 위치에 따라 일정 시간이 지연된 반사 신호가 안테나를 통해 수신되며 이 신호는 수신된 시점의 송신신호와 혼합기에서 혼합되어 차 주파수 성분을 발생한다. 이러한 차 주파수는 매우 미약하므로 증폭기에서 증폭한 후 대역통과필터에서 통과된 아날로그 신호는 ADC(Analog to Digital Converter)를 통해 디지털신

호로 변환된다. 변환된 디지털신호에서 차 주파수 성분을 추출하기 위해 DSP(Digital Signal Processor)를 이용한 Real FFT를 수행 한다.[1][2]

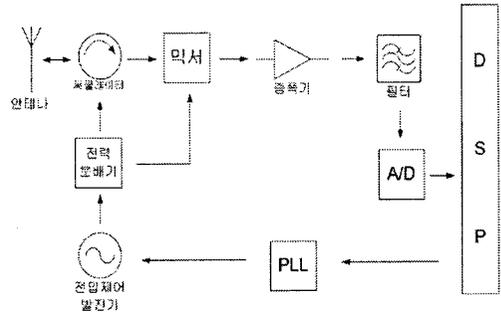


그림 2. FMCW 레이더 블록도
Fig. 2. FMCW radar block diagram

FFT의 특성상 거리분해능은 주파수 분해능에 비례한다. 따라서 높은 주파수 분해능을 위해서는 많은 샘플링 수와 낮은 샘플링 주파수를 가져야 한다. 그러나 샘플링 수의 증가는 하드웨어에 많은 메모리를 요구하므로 제작비가 증가하며, 낮은 샘플링 주파수는 신호처리 속도를 지연시키기 때문에 제작하기가 쉽지 않다. 본 논문은 Zoom FFT, Decimation, 디지털 저역통과 필터, Zero Padding의 신호처리를 수행하여 이를 해결하였다.

특정 주파수 대역에서 주파수 정보를 정확하게 분석하고자 할 때 특정 주파수 대역에 대한 분석과 확장을 Zoom FFT라고 한다.[3] 그림 3은 Zoom FFT의 처리 과정을 간략하게 나타내었다. Zoom FFT를 수행하게 되면 샘플링 주파수는 F_s/M , 샘플링 수는 N/M 이 된다. 여기서 M 은 Decimation Factor라고 한다.[4][5][6]

Zoom FFT 과정은 첫 번째 샘플링 된 값을 I채널과 Q 채널로 분류하기 위해 식 (2)(3)에서 보듯이 $\cos(2\pi f_c n t_s)$ 와 $-\sin(2\pi f_c n t_s)$ 를 곱한다.

$$i(n) = x(n)\cos(2\pi f_c n t) \quad (2)$$

$$q(n) = -x(n)\sin(2\pi f_c n t) \quad (3)$$

여기서 f_c 는 우리가 관심 있게 보고자 하는 주파수이다. 이때 $x(n)$ 에 \cos 과 $-\sin$ 을 곱하는 과정에서 생기는 이미지 주파수의 제거를 위하여 디지털 저역통과필

터를 사용한다.[7] 이미지 주파수가 제거된 신호는 M만큼 Decimation을 한다. 마지막으로 Decimation한 값을 가지고 FFT를 하면 Zoom FFT 과정이 끝나게 된다.

FFT하였을 때 주파수 분해능은 식(4)와 같다.

$$\Delta f = \frac{F_s}{N} \tag{4}$$

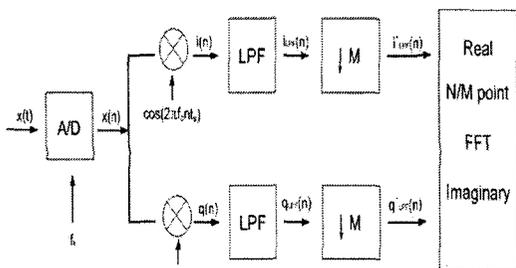


그림 3. Zoom FFT 처리 과정
Fig. 3. Zoom FFT processing

식 (4)와 같이 높은 주파수 분해능(Δf)을 가지기 위해서는 샘플링 수 N을 늘리거나 샘플링 주파수 F_s 를 낮춰야 된다. N을 늘리기 위하여 현재 가지고 있는 값 뒤에 "0"을 채워 넣는 Zero Padding 방법을 사용하였다.

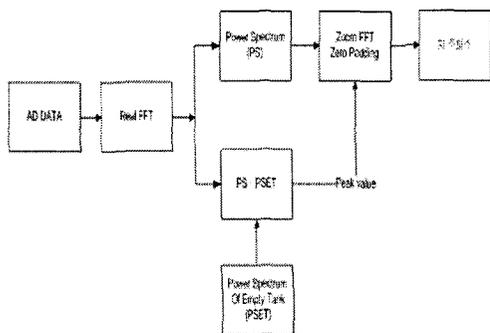


그림 4. 신호처리 알고리즘
Fig. 4. signal processing algorithm

FMCW 레이더 신호처리 알고리즘 과정을 그림 4에 나타내었다. ADC에서 샘플링 된 값을 Real FFT한 후, 빈 탱크의 스펙트럼을 제거하고, 최대 피크치를 가지는 주파수를 찾아 Zoom FFT를 수행한다. Zoom FFT 수행 후 샘플링 주파수는 F_s/M , 샘플링 수는 N/M , 주파수 분해

능은 Δf 가 된다. 주파수 분해능을 향상시키기 위해 N/M point FFT하기 전의 real값과 image값에 Zero Padding을 한 후 Complex FFT를 수행한다. 그 결과 샘플링 주파수는 F_s/M , 샘플링 수는 $(N/M)*K$, 주파수 분해능은 $\Delta f/K$ 가 된다. 이때 Zero Padding Factor K는 최종 샘플링 수 $(N/M)*K$ 가 2의 승수가 되도록 한다. Zoom FFT 과정에서 f_c 를 조금씩 변경하며 위의 과정을 반복하면 상이한 차 주파수 성분이 추출되며, 이를 평균하면 최종 차 주파수 성분이 된다.

시뮬레이션에 적용한 레이더 사양은 표 1과 같다

표 1.레이더 사양
Table 1. Radar specification

| | |
|--------------|-----------|
| BW (변조 폭) | 1.024 GHz |
| T (변조 주기) | 0.204 S |
| 샘플링 주파수 (Fs) | 5000 Hz |
| FFT 포인트수 | 1024 |
| 최대측정거리 | 35 m |
| 유류탱크의 깊이 | 35 m |

시뮬레이션 모델은 유류탱크로 하였으며, 빈 탱크의 주파수 성분을 추가하여 시뮬레이션을 하였다. 하지만 유류탱크의 환경적인 요소 즉, 대기상태, 오일의 유전율 등은 고려하지 않았다. 그림 5는 시뮬레이션 모델을 나타낸 것으로 f1은 유면까지의 거리정보를 가지는 차 주파수 성분이며 f1을 제외한 나머지 f2, f3, f4는 빈 탱크의 벽면까지의 거리를 나타내는 차 주파수 성분으로 표 2와 같다.

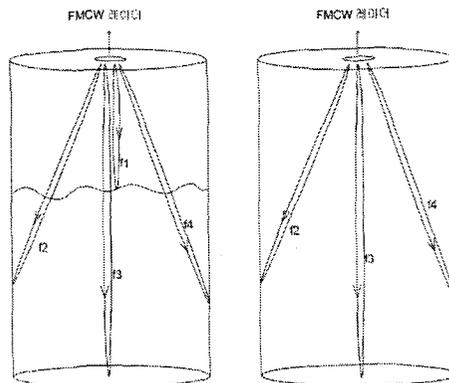


그림 5. 시뮬레이션 모델
Fig. 5. Simulation model

표 2. 시뮬레이션 값
Table 2. Simulation input data

| Sim | R (mm) | f1 (Hz) | 빈 탱크 (Hz) |
|-----|--------|-----------|--|
| #1 | 8484 | 567.8451 | f2 : 590.0481 f3 : 2455.1347 f4 : 683.7515 |
| #2 | 8489 | 568.17974 | |
| #3 | 8494 | 568.51438 | |
| #4 | 8499 | 568.84902 | |
| #5 | 8504 | 569.18366 | |

시뮬레이션은 Matlab을 이용하였으며 적용한 Decimation Factor는 M=16, Zero Padding Factor는 K=16이다. f_c 는 1 ~ 4Hz까지 1 Hz씩 변화시켜 시뮬레이션을 하였다. 5mm의 간격으로 유면이 변화하였을 때 차주파수를 시뮬레이션 하였으며 시뮬레이션 과정은 그림 6과 같다.

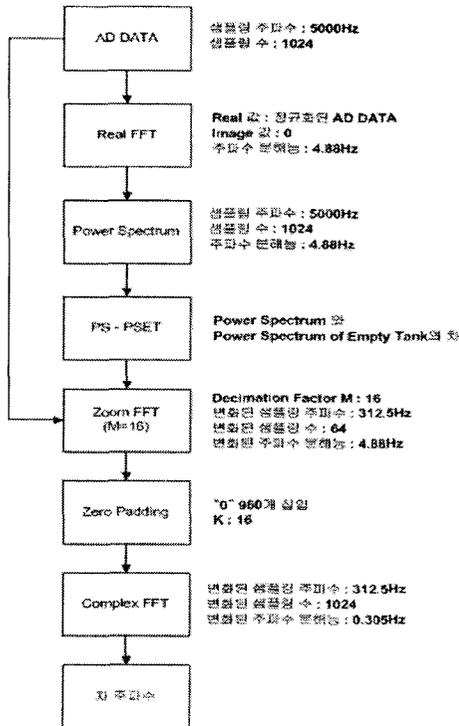


그림 6. 시뮬레이션 과정
Fig. 6. Simulation processing

표 3. f_c 에 따른 차 주파수(567.8451 Hz) 결과
Table 3. Beat frequency(567.8452 Hz) result by f_c

| Sim #1 | 차 주파수 (Hz) | 오차 (Hz) |
|---------------------------|------------|---------|
| $f_{c1} (f_c-1\text{Hz})$ | 567.84766 | 0.00256 |
| $f_{c2} (f_c-2\text{Hz})$ | 567.76318 | 0.08192 |
| $f_{c3} (f_c-3\text{Hz})$ | 567.67871 | 0.16639 |
| $f_{c4} (f_c-4\text{Hz})$ | 567.59424 | 0.25086 |
| 차 주파수평균 | 567.72095 | 0.12415 |

시뮬레이션 #1에서 f_c 의 변화에 따른 차 주파수는 표 3과 같다. 실제 차 주파수와 시뮬레이션 차 주파수는 0.00256 ~ 0.25086 Hz의 오차를 보인다.

표 4는 표 2의 차 주파수에 대한 시뮬레이션 결과를 거리로 환산한 결과이다. 거리 오차는 0.4915 ~ 4.7679 mm이다.

표 4. 시뮬레이션 거리 오차
Table 4. Simulation distance error

| Sim | 유면까지의 거리 (mm) | | 오차 (mm) |
|-----|---------------|-----------|---------|
| | 이론 값 | 시뮬레이션 | |
| #1 | 8484 | 8482.5493 | 1.4507 |
| #2 | 8489 | 8488.2490 | 0.7510 |
| #3 | 8494 | 8492.8088 | 1.1912 |
| #4 | 8499 | 8498.5085 | 0.4915 |
| #5 | 8504 | 8508.7679 | 4.7679 |

그림 7은 시뮬레이션 #5(차 주파수 : 569.18366 Hz)에서 (a)는 일부 유류가 채워진 탱크의 차 주파수 스펙트럼이며 (b)는 빈 탱크의 차 주파수 스펙트럼이다. (c)는 (a)의 차 주파수 스펙트럼에서 (b)의 차 주파수 스펙트럼을 제거한 결과이다. (d)는 Zoom FFT 수행 결과이다. 이때 주파수 분해능은 4.88 Hz, 샘플링 수는 64개이며 샘플링 주파수는 312.5 Hz이다. (e)는 Zero Padding을 한 결과 주파수 분해능은 0.305 Hz, 샘플링 수는 1024개이며 샘플링 주파수는 312.5 Hz이다.

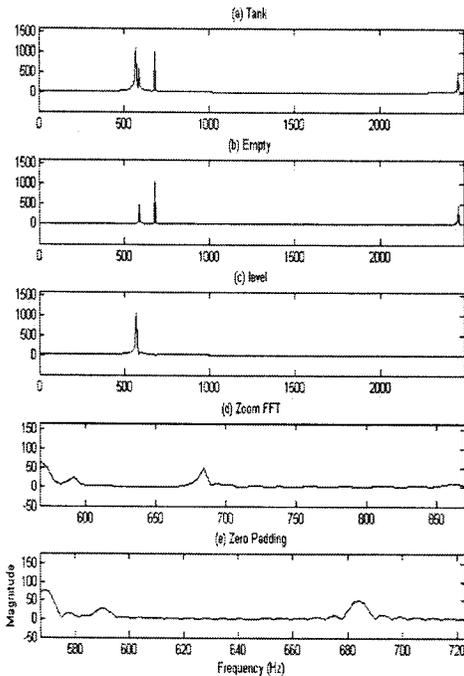


그림 7. 시뮬레이션 #5 결과
(차 주파수 : 569.18366 Hz)

Fig. 7. Simulation #5 result (beat frequency : 569.18366 Hz)

III. 결론

본 논문에서는 유류저장탱크 레벨 측정에 사용되는 FMCW 레이더의 신호처리를 연구하였다. FMCW 레이더의 거리 정보는 삼각파 송신신호와 수신신호의 시간 차에 따른 차 주파수로 나타난다. 따라서 시간영역의 신호에 포함된 주파수 성분을 추출하기 위하여 Real FFT를 사용한다. 유류저장탱크 레벨측정은 작은 거리변화의 검출을 필요로 하고 이러한 거리 변화는 작은 주파수 변화로 나타난다. 따라서 레이더의 거리분해능을 높이기 위해서는 시간 영역에 포함된 미세한 주파수 변화를 검출해야 한다. 그러나 FFT의 특성상 미세한 주파수 변화를 검출하기 위해서는 많은 샘플링 수와 낮은 샘플링 주파수가 필요하다.

이를 개선하기 위해 Zoom FFT, Decimation, 디지털 저역통과 필터를 이용하여 샘플링 주파수를 낮췄고, Zero Padding을 통해서 샘플링 수를 늘렸다. 본 논문에서는 샘플링 수 1024, 샘플링 주파수 312.5 Hz를 사용하여 0.305 Hz의 주파수 분해능을 실현하였으며, 이는 $\pm 5\text{mm}$ 의 거리 정확에 해당된다.

본 연구에서는 유류탱크의 내부 대기 환경을 고려하지 않았으나 차후 유류탱크의 내부 대기상태, 오일의 유전율 등 환경적인 요소를 추가하여 연구를 진행 할 것이며, 연구된 알고리즘을 DSP (Digital signal processor)로 구현할 예정이다.

참고문헌

- [1] D. Brumbi, "LOW POWER FMCW RADAR SYSTEM FOR LEVEL GAGING", 2000 IEEE p. 1559-1562
- [2] Dr. Detlef Brumbi, "Measuring Process and Storage Tank Level with Radar Technology", 1995 IEEE p. 256-260
- [3] Thrance, N. B. "Zoom FFT", Bruel & Kjaer Tech. Rev., 1980, No. 2, pp. 3-41
- [4] Jonathan Y. Stein, "Digital Signal Processing : A Computer Science Perspective", John Wiley & Sons, INC. 2000
- [5] Richard G. Lyons, "Understanding Digital Signal Processing : second edition", Pearson Education, INC. 2004
- [6] 박종연, 조계현, "특정 대역 신호의 주파수 성분 분석을 위한 ZOOM FFT 기법", 강원대학교, 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p. 3091-3093
- [7] 백제인, 김진업, "표본화 속도 변환기용 2단 직렬형 다상 FIR 필터의 설계", 한국통신학회논문지 '06-8 Vol.31 No.8C p. 806-815

저자소개



김민준(Kim Min Joon)

1980. 2 아주대학교 전자공학과 졸업
공학사

1982. 2 고려대학교 전자공학과
공학석사

1988. 2 고려대학교 전자공학과 공학박사

1986. 3 ~ 현재 동의대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심분야: 마이크로파 회로 설계, 안테나



천이환(Cheon I Hwan)

2006. 2 동의대학교 정보통신공학과
졸업 공학사

2006. 3 ~ 현재 동의대학교
정보통신공학과 석사과정

※ 관심분야: 마이크로파 회로 설계, 안테나



김주현(Kim Ju Hyun)

2006. 2 동의대학교 정보통신공학과
졸업 공학사

2006. 3 ~ 현재 동의대학교
정보통신공학과 석사과정

※ 관심분야: 마이크로파 회로 설계, 신호처리