

## 소형선박용 X-Band FMCW 레이더 신호처리부 설계 및 구현

김정연<sup>1</sup>, 정길도<sup>1\*</sup>, 김태영<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>전북대학교 전자정보공학부

### X-Band FMCW RADAR Signal Processing for small ship

Jeong-Yeon Kim<sup>1</sup>, Kil-To Chong<sup>1\*</sup> and Tae-Yeong Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Electronics and Information Department, Chonbuk National University

**요 약** 기존의 해상용 레이더는 원거리 탐지 목적의 고출력 송신을 할 수 있는 펄스 레이더로써, 장착 및 유지비용에 대한 부담으로 대부분 중대형 선박에서 사용되고 있다. 근거리탐지로 충돌 회피가 가능한 소형선박에 기존의 펄스 레이더 대신 저전력으로 운용가능하며 분해능이 높은 FMCW방식의 레이더를 적용하고자 한다.

FMCW방식의 송수신 신호를 이론적으로 분석하고, 실제 FMCW레이더 구현시 적용 가능한 신호처리 설계 및 모의실험을 수행하여 거리 및 속도를 검출하였다. FMCW 레이더의 신호처리 시뮬레이션을 수행하기 위하여 가상 송수신 신호를 혼합한 중간주파수(IF : Intermediate Frequency) 신호를 생성하고 저역통과 필터를 거쳐 잡음 제거를 한 후, A/D변환기를 사용하지 않는 대신에 FFT크기에 대한 샘플간격으로 주파수 최대값을 검출하여 물체와의 거리 및 속도 주파수를 구하고, 최종적으로 거리 및 속도를 계산하는 신호처리 과정을 모의 실험하였다.

실제 FMCW레이더 신호처리 과정에서 거리 및 속도 검출에 사용되는 차주파수 신호의 특징을 분석하기 위해서 송수신 신호의 차 공식을 이용하여 MATLAB으로 가상 차주파수 신호를 설계하였다. 이를 이용하여 임의의 거리 및 속도에 대한 가상 차주파수 신호를 발생시켜 각 신호에 대한 특징을 비교 분석하였다.

**Abstract** Conventional marine radar systems utilize pulse radar which is capable of high-power transmissions and is effective for remote detection purposes. A pulse radar is most commonly used on medium or large vessels due to its expensive installation and maintenance costs. I propose the use of a Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) radar system operated at low-power and high-resolution instead of the conventional pulse-radar based system.

The transmitted and received signals of the FMCW radar system were theoretically analyzed and radar signal processing design and simulation experiments were performed to detect the range and speed. Intermediate Frequency (IF) signal mixed with virtual transmit and receive signals were generated to perform FMCW radar signal processing simulations where the IF signal underwent noise reduction through a lowpass filter. The maximum frequency was derived through the sample interval of the FFT size instead of using A/ D converter. This maximum frequency was used to get the frequency range and frequency speed which were in turn used to calculate the range and speed.

The virtual beat frequency generated using MATLAB is utilized to analyze the beat frequency used in the actual FMCW radar system signal processing. The differences in the range and speed of the beat frequency signals are processed and analyzed.

**Key Words** : FMCW, Marine radar

### 1. 서론

선박용 레이더란 선박에서 사용하기 위해 설계된 레이더 장치로서, 해상의 장애물, 다른 선박, 해안 등을 탐지

본 연구는 과학기술부 지역혁신 인력양성사업과 2차 BK 사업의 지원으로 이루어졌으며 관계자에 감사를 드립니다.

\*교신저자 : 정길도 (kitchong@chonbuk.ac.kr)

접수일 09년 09월 01일      수정일 (1차 09년 10월 06일, 2차 09년 11월 11일)

게재확정일 09년 11월 12일

하고 그들의 위치와 자기 선박으로부터의 거리, 방향을 평면 위치 표시기 위에 표시하도록 되어 있다[1]. 일반적으로 많이 사용되고 있는 선박용 레이더로는 펄스형태의 신호를 사용하는 레이더이다. 레이더 장착이 필수적인 중대형 선박은 특성상 충돌 가능성을 예측할 수 있는 범위가 넓어야 하기 때문에 그만큼 고출력 송신을 할 수 있는 펄스형태의 레이더를 장착하고 있다.

우리나라의 경우 현재 해상용 레이더는 선진국과 비교해볼 때 중대형 위주로 사용되고 있으며 소형선박의 레이더 장착이 보편화되지 못하고 있는 실정이다. 우리나라는 삼면이 바다인 반도국이며 세계 1~2위인 조선 산업의 기술력, 세계적인 수준의 선박 설계 및 성능 평가 능력, 선박용 기자재 대부분의 국내 생산 등을 감안하면 중대형 위주의 선박시장을 소형 선박으로까지 넓힐 수 있는 잠재적인 가능성이 크다고 할 수 있다.

원양이나 근해 등 원거리 항해를 하는 대형선박의 경우 6kW이상, 연해를 항해하는 소형선박의 경우 2-4kW 정도의 고출력 송신을 위해 마그네트론을 장착한 펄스 레이더를 탑재하고 있다. 모든 해상 선박들은 적용된 전압에 따라 물체에 반사되는 극초단파를 발생하는 강력한 진공튜브인 마그네트론을 장착하고 있는데, 현재 고가로서 수명이 제한되어 있다는 단점을 가지고 있다.

중대형 선박의 경우 관성의 영향을 고려하여 충돌 가능성을 예측할 수 있는 범위가 넓어야 하기 때문에 최소 탐색범위가 별다른 영향을 주지 않지만, 기동성에 별다른 문제가 없는 소형 어선이나 레저보트 등의 경우엔 비교적 근거리에서 위험을 탐지한다고 하여도 충돌을 회피할 수 있는 기회가 충분하므로 그만큼 근거리 물체 검출이 중요하다.

FMCW 레이더는 주파수 측정으로 보다 정밀한 위치 측정이 가능하기 때문에 석유화학 제품의 저장탱크, 선박의 오일탱크, 항공기의 고도계 탱크 내의 수위계, 조위계(潮位計) 등에 폭넓게 사용되고 있다. 이를 소형선박용 레이더에 적용시킬 경우 기본적으로 탐지 물체의 거리뿐만 아니라 상대속도 정보도 계측가능하기 때문에 상대 선박 탐지시 보다 유용하게 작용한다.

펄스 레이더의 경우 송신하는 동안 수신을 하지 못하므로 분해능이 떨어지며, 강한 송신 펄스로 인해 짧은 거리의 물체 측정이 어렵다. 또한 마그네트론을 이용한 고출력 송신을 하기 때문에 고압증폭으로 인한 하드웨어 고장률이 높다. 이에 비해 FMCW레이더의 경우 송수신이 동시에 이루어지므로 분해능이 좋고 선형파를 이용한 짧은 거리 분해능이 펄스 레이더에 비해 아주 높다. 그리고 기존 펄스 레이더에 비해 수백에서 수천배 낮은 전력을 사용하기 때문에 배터리의 부하가 거의 없고 전기적

인 원인으로 인한 고장이 적다.

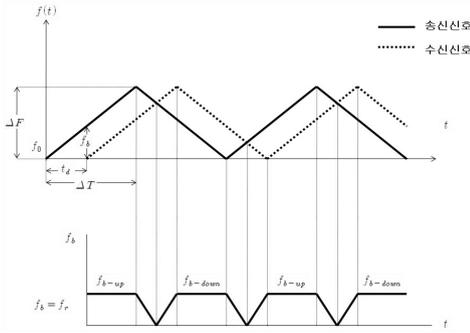
펄스 레이더의 경우 펄스폭을 너무 길게 하면 거리분해능이 나빠지고 펄스 반복 주기를 짧게 하면 잔광성과 근거리 물체의 어그러짐, 변침시 영상의 비틀림이 생긴다. 따라서 같은 레이더에서도 거리범위에 따라 펄스폭 및 펄스반복 주기를 달리 하고 있다. 근거리 탐지에 있어서는 거리 분해능을 높이고 최소 탐지거리를 줄이기 위하여 펄스폭을 좁게 하고 정보의 빈도를 높이기 위하여 펄스 반복 주기를 짧게 한다. 원거리 탐지의 경우는 송신출력을 높여 에너지에 해당하는 펄스폭을 길게 하여 최대 탐지거리를 증가시키고, 모호성으로 인한 2차 소인에 의한 거짓상을 방지하기 위하여 펄스 반복 주기를 길게 한다. 하지만 펄스 레이더의 경우 송신하는 동안 수신을 하지 못하므로 그만큼 분해능이 떨어지며, 강한 송신출력으로 인한 펄스폭의 제약으로 짧은 거리에 있는 물체의 측정이 어렵다. 이에 비해 FMCW 레이더의 경우 송수신이 동시에 이루어지므로 분해능이 좋고, 분해능 향상을 위해 펄스 레이더에서 에너지에 해당하는 펄스폭을 좁게 만드는 것보다 FMCW레이더에서 발진기의 변조 대역폭을 조정하는 것이 쉽고 송신출력에 대한 제약요인이 적다.

기존의 해상용 레이더는 원거리 탐지 목적의 고출력 송신을 할 수 있는 펄스 레이더로서, 이는 원해를 운항하는 중대형 선박의 경우 유리하지만 근거리탐지라도 충돌 회피가 가능한 소형선박의 경우엔 장착 및 유지비용에 대한 부담으로 대부분 12m이상의 선박에 장착되고 있다. 근거리 물체 검출이 중요하며 유지비용을 최소화해야 하는 소형 어선이나 레저선박에 기존의 펄스 레이더 대신에 저전력으로 운용가능하며 분해능이 높은 FMCW레이더를 적용하고자 한다.

본 논문에서는 FMCW 레이더 송수신 신호를 이론적으로 분석하고, MATLAB를 이용하여 FMCW 방식의 선박용 레이더 신호처리 설계 및 모의실험을 수행하여 거리 및 속도를 검출하였다. 실제 FMCW레이더 신호처리 과정에서 거리 및 속도 검출에 사용되는 차주파수 신호 특징을 분석하기 위해서 송수신 신호의 차 공식을 이용하여 가상 차주파수 신호를 설계하였다. 이를 이용하여 임의의 거리 및 속도에 대한 가상 차주파수 신호를 획득하여 각 신호에 대한 특징을 비교 분석하였다.

## 2. 본론

### 2.1 삼각파 신호를 이용한 물체 측정 원리



[그림 1] 물체가 정지해 있을 경우의 시간-주파수 특성

그림 1과 같이 변조 구간이  $\Delta T$ 인 선형 FM 신호의 상승구간에서 송신 주파수  $f_{t-up}$ 와 하강구간에서 송신 주파수  $f_{t-down}$ 는 식(1)과 같다.

$$f_{t-up}(t) = f_0 + \alpha t, \quad (1)$$

$$0 < t < \Delta T$$

$$f_{t-down}(t) = f_0 + \Delta F - \alpha t, \quad \Delta T < t < 2\Delta T$$

여기서  $f_0$ 는  $t=0$ 일 때 중심 주파수이고,  $\Delta F$ 는 주파수 변조 대역폭이다.  $\alpha$ 는 FMCW의 시간당 주파수  $f$ 의 변화율로서 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = \frac{df}{dt} = \frac{\Delta F}{\Delta T} \quad (2)$$

$t=0$ 일 때 주파수 위상  $\phi$ 을 0이라 가정하면, 상승구간의 송신 주파수 위상  $\phi_{t-up}(t)$ 와 하강구간의 송신 주파수 위상  $\phi_{t-down}(t)$ 은 식(3)으로 표현된다.

$$\phi_{t-up}(t) = 2\pi \int_0^t f_{t-up}(x) dx \quad (3)$$

$$= 2\pi [f_0 t + \frac{\alpha}{2} t^2], \quad 0 < t < \Delta T$$

$$\phi_{t-down}(t) = 2\pi \int_0^t f_{t-down}(x) dx$$

$$= 2\pi [(f_0 + \Delta F)t - \frac{\alpha}{2} t^2], \quad \Delta T < t < 2\Delta T$$

따라서 송신단에서 방사되는 전자기파의 전력크기가  $a$ 인 상승구간 송신 신호  $s_{t-up}(t)$ 와 하강구간 송신 신호  $s_{t-down}(t)$ 는 식(4)과 같다.

$$s_{t-up}(t) = a \cdot \cos 2\pi [f_0 t + \frac{\alpha}{2} t^2], \quad (4)$$

$$0 < t < \Delta T$$

$$s_{t-down}(t) = a \cdot \cos 2\pi [(f_0 + \Delta F)t - \frac{\alpha}{2} t^2], \quad \Delta T < t < 2\Delta T$$

상승 및 하강 구간에서의 수신 신호는 전파 지연 시간  $t_d$  및 도플러 효과에 의한 주파수  $f_d$ 를 고려하여 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

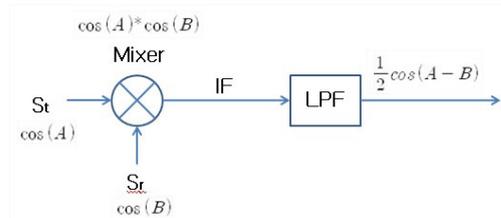
$$s_{r-up}(t) = \frac{b}{a} s_{t-up}(t - t_d)$$

$$= b \cdot \cos 2\pi [(f_0 \pm f_d)(t - t_d) + \frac{\alpha}{2} (t - t_d)^2], \quad t_d < t < \Delta T$$

$$s_{r-down}(t) = \frac{b}{a} s_{t-down}(t - t_d)$$

$$= b \cdot \cos 2\pi [(f_0 + \Delta F \pm f_d)(t - t_d) - \frac{\alpha}{2} (t - t_d)^2], \quad \Delta T + t_d < t < 2\Delta T + t_d \quad (5)$$

물체가 근접하는 경우 중심주파수에 도플러 주파수 값이 더해지고, 물체가 멀어지는 경우 도플러 주파수 값이 빠진다. 여기서  $b$ 은 왕복 거리에 따른 전자파의 감쇄량을 나타낸다.



[그림 2] LPF를 이용한 FMCW 차주파수 신호

그림 2를 보면 상승 및 하강구간에서 송신된 신호  $S_t$ 와 수신된 신호  $S_r$ 는 믹서에서 혼합되어 두 주파수의 합과 차에 해당하는 주파수 신호인  $\cos(A)\cos(B) =$

$\frac{1}{2} \cos(A+B) + \frac{1}{2} \cos(A-B)$ 를 얻게 된다. 이 중에서 합에 해당되는 성분  $\frac{1}{2} \cos(A+B)$ 은 저역통과 여파기를 거쳐 제거되고 차에 해당되는 성분  $\frac{1}{2} \cos(A-B)$ 만이 남게 된다. 이와 같이 두 신호간의 차이를 차 주파수(beat frequency)라 하며, 상승구간에서의 차 주파수 신호  $s_{b-up}(t)$ 와 하강 구간에서의 차 주파수 신호  $s_{b-down}(t)$ 는 식(6)과 같다.

$$s_{b-up}(t) = c \cdot \cos 2\pi[f_0 t_d \mp f_d(t-t_d) - \frac{\alpha}{2} t_d^2 + \alpha t_d t], t_d < t < \Delta T$$

$$s_{b-down}(t) = c \cdot \cos 2\pi[(f_0 + \Delta F)t_d \mp f_d(t-t_d) + \frac{\alpha}{2} t_d^2 - \alpha t_d t], \Delta T + t_d < t < 2\Delta T$$

(6)

여기서  $c$ 는 믹서의 변환 손실을 포함한 항을 나타낸다. 차 주파수 신호  $s_b(t)$ 의 주파수 성분  $\alpha t_d$ 는 송신 신호  $s_t(t)$ 와 수신 신호  $s_r(t)$ 의 차 주파수  $f_b$ 가 되며 지연시간을 고려하여 식(7)으로 표현할 수 있다. 여기서 지연시간  $t_d$ 은 전파의 속도  $c$ 로 거리  $R$ 을 왕복하는 시간이므로  $t_d = \frac{2R}{c}$ 이다[2,3]

$$f_b = \alpha t_d + f_d = \frac{\Delta F}{\Delta T} \frac{2R}{c} \mp f_d$$

(7)

그림 1에서와 같이 물체가 정지해 있을 경우에는 도플러 효과에 의한 천이가 발생하지 않으므로 도플러 주파수  $f_d$ 는 0이 되어 차주파수는 거리 주파수  $f_r$ 이 된다. 주파수 값은 푸리에 변환과 같은 주파수 변환으로 추정하므로 음의 주파수를 구분할 수 없기 때문에 절대값을 가지므로 주파수가 상승하는 동안에 발생하는 차주파수와 하강하는 동안에 발생하는 차주파수 값은 동일하다[4].

거리 주파수를 이용하여 물체까지의 거리  $R$ 을 구해 보면 식(9)과 같다.

$$f_r = \frac{\Delta F}{\Delta T} t_d$$

(8)

$$R = \frac{c \cdot t_d}{2} = \frac{c \cdot \Delta T \cdot f_r}{2 \cdot \Delta F}$$

(9)

그림 3은 물체가 이동하는 경우 수신된 파형은 도플러 주파수 편이에 의해 어느 한 부분은 주파수가 증가하고 다른 한 부분은 주파수가 감소하게 되며, 근접할 때와 멀어지는 경우로 나누어진다.

수신 신호에 거리에 따른 주파수 변화와 도플러 효과에 의한 속도 주파수 변화량이 더해져서 주파수가 상승 및 하강하는 동안에 발생하는 차주파수는 서로 상이한 값을 가진다. 이처럼 도플러 효과에 의한 천이가 발생하는 경우 상승 및 하강 구간의 변조 주기마다 차주파수를 각각 측정하여 합과 차의 간단한 연산을 통하여 거리 및 속도 주파수를 동시에 측정할 수 있다. 표 1과 같이 물체의 이동 방향에 따라 상승 및 하강구간에서 차주파수의 값은 달라진다[7,8].

[표 1] 도플러 주파수 값에 따른 구간별 차주파수

	물체 이동방향	상승구간 차주파수 ( $f_{b-up}$ )	하강구간 차주파수 ( $f_{b-down}$ )
$f_r > f_d$	근접하는 경우	$f_r - f_d$	$f_r + f_d$
	멀어지는 경우	$f_r + f_d$	$f_r - f_d$
$f_r < f_d$	근접하는 경우	$f_d - f_r$	$f_d + f_r$
	멀어지는 경우	$f_d + f_r$	$f_d - f_r$

$f_r > f_d$ 인 경우 물체가 레이더로 다가올 때의 수신 신호는 도플러 효과에 의해 주파수가 더해져서 도플러주파수 값만큼 위로 천이되어 상승구간의 차주파수 값은 거리주파수와 도플러 주파수의 차가 되고, 하강구간의 차주파수 값은 거리 주파수와 도플러 주파수의 합이 된다. 이와 반대로 물체가 멀어지는 경우 수신 신호는 도플러주파수 값만큼 아래로 천이되어 상승구간의 차주파수는 거리와 도플러 주파수의 합이 되고, 하강구간의 차주파수는 거리와 도플러 주파수의 차가 된다.

$f_r < f_d$ 가 성립하는 경우는 매우 위험한 상황이며 일반적인 선박용 레이더로 활용시 가능성이 낮기 때문에 본 논문에서는  $f_r > f_d$ 인 경우만을 고려할 것이다[5].

상승 및 하강 구간의 차주파수로부터 거리 주파수는 식(10), 도플러 주파수는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

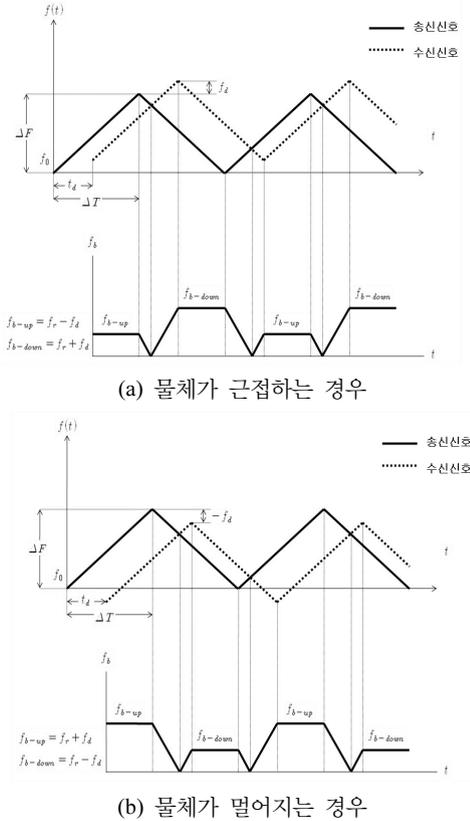
$$f_r = \frac{f_{b-down} + f_{b-up}}{2}$$

(10)

$$f_d = \frac{f_{b-down} - f_{b-up}}{2} \quad (11)$$

이때 상대속도  $V_r$ 은 식(12)과 같다.

$$V_r = \frac{c \cdot f_d}{2 \cdot f_0} \quad (12)$$



[그림 3] 물체가 이동하는 경우의 시간-주파수 특성

### 2.2 가상 IF 신호를 이용한 신호추정 및 결과

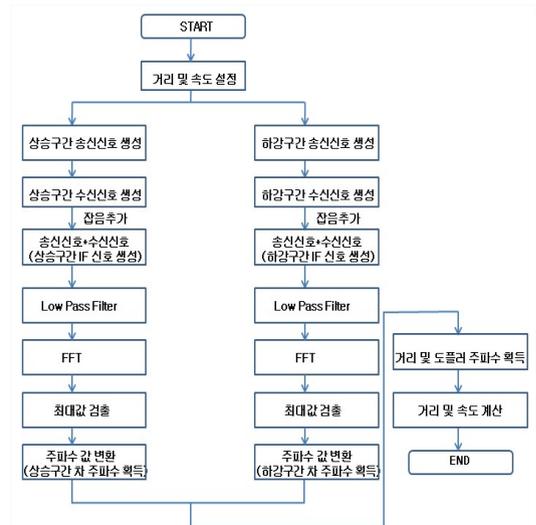
FMCW 레이더는 시간에 따라 주파수가 선형적으로 변화하는 송신신호를 발생시켜 안테나를 통해 자유공간 상으로 방사시킨다. 수신신호는 왕복거리에 의한 전파 지연시간 뒤에 수신되기 때문에 송수신 간 주파수 차이가 나게 된다. 이 두 신호를 혼합기에 넣어 차 주파수인 비트신호를 생성하게 되고, 디지털 신호 처리부는 이러한 비트 신호를 A/D변환하여 FFT와 같은 주파수 해석을 통하여 차주파수를 검출하여 물체와의 거리 및 속도를 계산하게 된다[4,5].

본 절에서는 설정된 거리 및 속도에 대한 가상 송수신 신호를 생성하여 이를 혼합한 IF신호를 이용하여 물체와의 거리 및 속도를 계산하는 일련의 신호처리 과정을 MATLAB을 이용하여 모의 실험하였다.

표 2와 같이 신호처리를 위한 파라미터를 설계하여 모의실험을 수행하였다. 그림 4는 임의의 설정된 거리 및 속도에 따른 가상 송수신 신호를 혼합한 IF 신호를 생성하여 저역통과 필터를 거쳐 잡음 제거를 한 후, 이를 FFT 크기에 대한 샘플간격으로 주파수 최대값을 검출하여 이에 대한 거리 및 속도 주파수를 구하고, 최종적으로 물체의 거리 및 속도를 계산하는 신호처리 과정을 나타내고 있다.

[표 2] 신호처리를 위한 파라미터 설계

파라미터	설정값
중심 주파수( $f_0$ )	9.41GHz
주파수 변조 대역폭( $\Delta F$ )	30MHz
변조 주기( $\Delta T$ )	1ms
최대 측정 거리( $R_{max}$ )	5km
최대 측정 속도( $V_{max}$ )	100m/s
샘플링 주파수( $f_s$ )	2515684Hz
FFT 포인트 수( $N$ )	2432

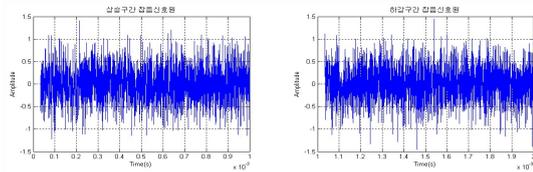


[그림 4] 신호추정을 위한 모의실험 순서도

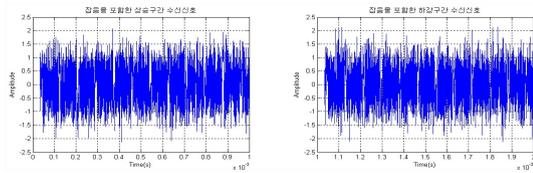
그림 5는 일정 위치에 정지해있는 레이더로부터 100m 거리에 있는 물체가 10m/s의 상대 속도로 다가오는 경우 가상 수신신호에 SNR=5dB로 가우시안 잡음을 포함한 상승 및 하강 구간에서의 IF 신호를 나타내고 있다. 잡음

을 포함한 IF 신호를 저역통과 필터를 적용하여 원치 않는 주파수 대역을 감쇄시켰다. 그림 6은 차주파수의 주파수 최대값을 고려하여 차단주파수 22kHz로 설정하여 해당 주파수 대역 이하의 신호만을 통과한 IF 신호를 나타내고 있다.

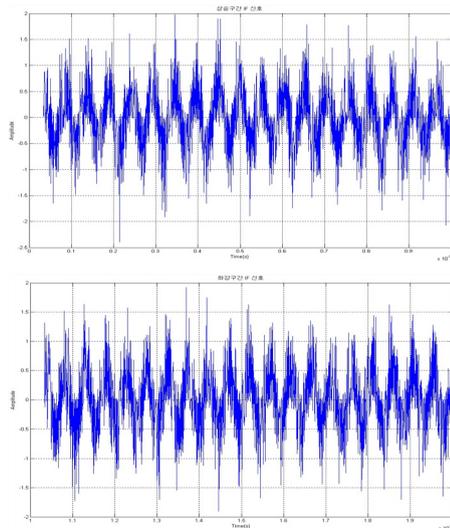
표 3은 잡음을 포함한 IF 신호를 저역통과 필터에 통과시켜 주파수를 획득하여 거리 및 속도 계산을 수행한 결과 값이다.



(a) 잡음 신호원

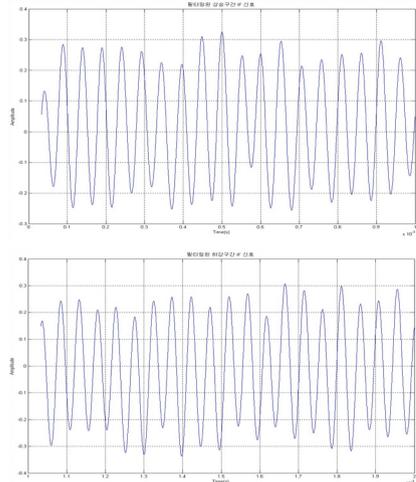


(b)잡음을 포함한 상승 및 하강구간 수신 신호(SNR=5dB)



(c) 잡음을 포함한 상승 및 하강구간에서의 IF 신호

[그림 5] 잡음을 포함한 IF 신호 생성

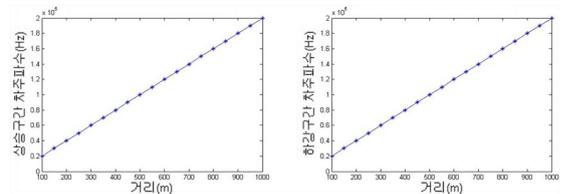


[그림 6] 저역통과필터를 통과한 상승 및 하강구간 IF 신호(차단주파수=22kHz)

[표 3] 시뮬레이션 결과(실제거리:100m, 실제속도:10m/s)

상승구간 차주파수	19653.781250 [Hz]
하강구간 차주파수	20688.190789 [Hz]
거리 주파수	20170.986020 [Hz]
도플러 주파수	517.204770 [Hz]
탐지 거리	100.854930 [m]
탐지 속도	8.244497 [m/s]

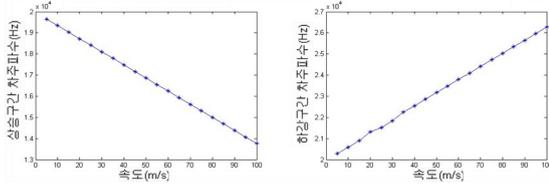
다음은 위 시뮬레이션 과정을 통해 거리 및 속도에 따른 주파수 검출을 수행하였다. 그림 7은 레이더와 물체 간의 상대속도가 0인 경우 거리에 따른 상승 및 하강구간 차주파수의 값을 그래프로 나타내고 있다. 도플러 효과가 발생하지 않으므로 상승 및 하강 구간의 차주파수는 같고, 이는 거리 주파수 값과 동일하다. 거리가 증가할수록 거리 주파수 획득 값은 이에 비례하여 증가한다.



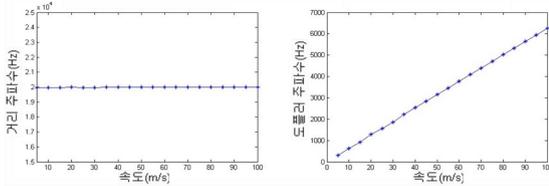
[그림 7] 고정 물체의 거리에 따른 상승 및 하강구간 차주파수 획득

그림 8.(a)는 고정된 거리 100m상에서 물체가 레이더로 다가오는 경우 속도에 따른 상승 및 하강 구간의 차주파수 획득 값을 나타내고 있다. 도플러 효과에 의해 상승구간과 하강구간의 차주파수는 서로 다른 값을 가지는데 이 경우 상승구간의 차주파수는 하강구간의 차주파수 값

보다 작은 값을 가진다. 그림 8.(b)는 상대 속도가 증가할수록 도플러 주파수 값도 비례하여 증가함을 나타내고 있다.

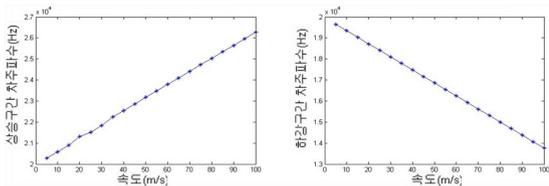


(a) 이동 물체의 속도에 따른 상승 및 하강구간 차주파수

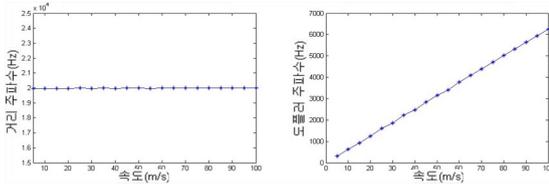


(b) 이동 물체의 속도에 따른 거리 및 도플러 주파수  
**[그림 8]** 이동 물체의 속도에 따른 주파수 획득(물체가 다가오는 경우)

그림 9.(a)는 고정된 거리 100m상에서 물체가 레이더로 멀어지는 경우 속도에 따른 상승 및 하강 구간의 차주파수 획득 값을 나타내고 있다. 물체가 다가오는 경우 그림 8.(a)을 보면 상승구간의 차주파수는 감소하고 하강구간의 차주파수는 증가함을 보이지만, 물체가 멀어지는 경우 그림 9.(a)를 보면 상승구간의 차주파수는 증가하고 하강구간의 차주파수는 감소함을 보인다. 이는 도플러 효과에 의한 것으로, 물체가 근접하는 경우 중심주파수에 도플러 주파수 값이 더해지고 물체가 멀어지는 경우 도플러 주파수 값만큼 감소하게 되는 현상으로 보인다.



(a) 이동 물체의 속도에 따른 상승 및 하강구간 차주파수



(b) 이동 물체의 속도에 따른 거리 및 도플러 주파수  
**[그림 9]** 이동 물체의 속도에 따른 주파수 획득(물체가 멀어지는 경우)

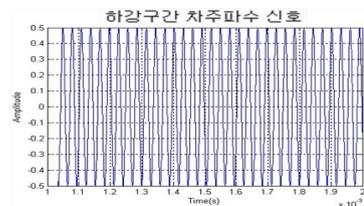
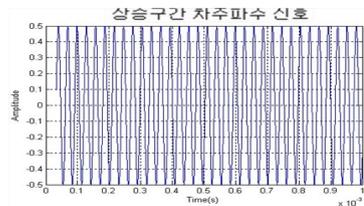
### 2.3 가상 차주파수 신호 생성 및 분석

본 논문에서는 실제 FMCW 레이더 신호처리 과정에서 사용되어지는 차주파수 신호를 관찰 및 분석하기 위해서 IF 신호가 LPF를 통과하여 차주파수 신호를 획득한 상태로 가정하여 가상 비트신호를 생성 이를 비교 분석하였다. 가상 비트 신호를 얻기 위해서 MATLAB을 이용하여 가상 송수신 주파수의 차 공식으로 신호를 설계하였다. 가상 물체가 레이더로부터 일정 거리에 있다는 가정 하에 상대속도가 0인 경우와 상대 속도가 있을 경우의 차주파수 신호의 변화를 살펴보았다.

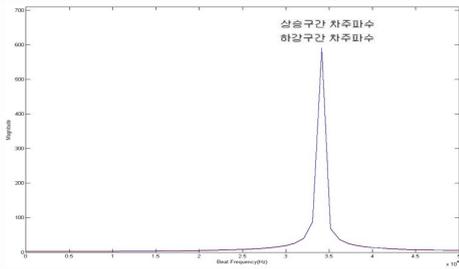
그림 10.(a)는 200m 거리상에서 상대 속도가 0인 가상 물체가 존재할 경우 시간영역에서 상승 및 하강 구간의 차주파수 신호를 나타내고 있다. 거리에 따라 일정한 정현파 신호를 가지는 차주파수 신호는 이처럼 속도 변화가 없을 경우 상승 및 하강 구간에서 시간에 따라 동일한 파형을 보인다. 상승 및 하강 구간의 주파수 최대값이 동일한 값을 가지므로 그림 10.(b)처럼 스펙트럼 상에서 차주파수가 하나로 겹쳐 나타난다.

그림 11은 거리 80m에서 레이더로부터 60m/s로 물체가 다가오는 경우의 차주파수 신호이다. 도플러 주파수의 영향으로 상승 및 하강 구간 차주파수 신호의 주기가 서로 다르다. 즉, 스펙트럼 상에서 상승 및 하강구간의 주파수 최대값이 두 개로 분류되어 나타난다. 하강구간의 차주파수가 상승구간의 차주파수보다 크므로 물체가 레이더를 향해 다가오는 신호라는 것을 알 수 있다.

레이더로부터 물체가 멀어지는 경우 상승 및 하강 구간의 차주파수 신호는 그림 12처럼 도플러 주파수의 영향으로 신호의 주기가 다르게 나타난다. 레이더로 다가오는 경우와 반대로 상승구간의 주파수 최대값이 하강 구간의 주파수 최대값보다 큰 값을 가진다. 이를 통해 물체가 레이더로부터 멀어지는 신호라는 것을 알 수 있다.

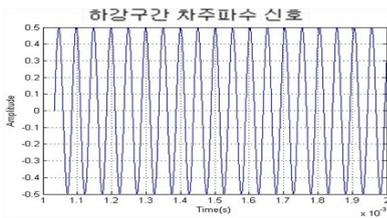
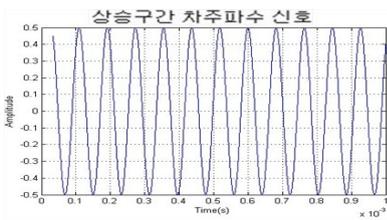


(a) 고정 물체의 차주파수 신호

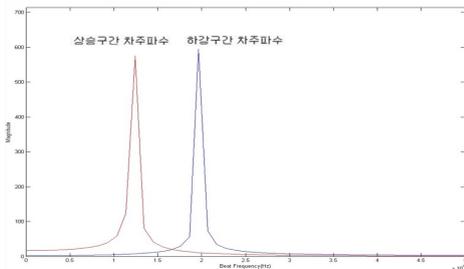


(b) 고정 물체의 차주파수 신호 스펙트럼

[그림 10] 고정 물체의 차주파수 신호(거리:200m, 상대속도:0)

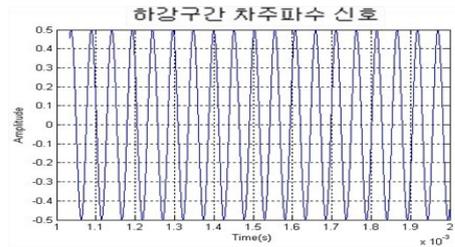
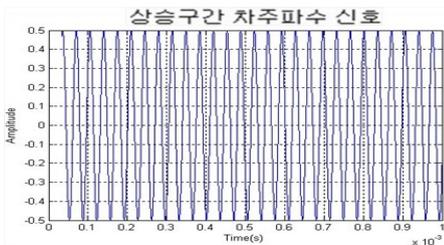


(a) 이동 물체의 차주파수 신호

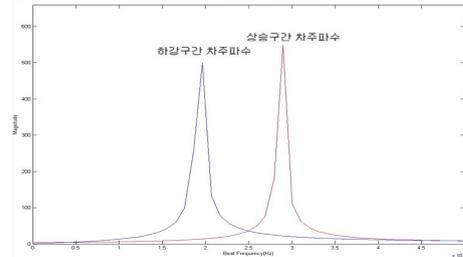


(b) 이동 물체의 차주파수 신호 스펙트럼

[그림 11] 레이더로 다가오는 경우 차주파수 신호(거리:80m, 상대속도:60m/s)



(a) 이동 물체의 차주파수 신호



(b) 이동 물체의 차주파수 신호 스펙트럼

[그림 12] 레이더로부터 멀어지는 경우 차주파수 신호(거리:120m, 상대속도:75m/s)

[표 4] 시뮬레이션 결과  
(거리 : 200m, 상대속도 : 0 )

	결과 값
상승구간 차주파수	40341.972039[Hz]
하강구간 차주파수	40341.972039[Hz]
탐지 거리	201.709860[m]
탐지 속도	0[m/s]

[표 5] 시뮬레이션 결과  
(거리 : 80m, 상대속도 60m/s로 접근하는 경우 )

	결과 값
상승구간 차주파수	12412.914474[Hz]
하강구간 차주파수	19653.781250[Hz]
탐지 거리	80.166739[m]
탐지 속도	57.711478[m/s]

[표 6] 시뮬레이션 결과  
(거리 : 120m, 상대속도 75m/s로 멀어지는 경우 )

	결과 값
상승구간 차주파수	28963.467105[Hz]
하강구간 차주파수	19653.781250[Hz]
탐지 거리	121.543121[m]
탐지 속도	-74.200472 [m/s]

### 3. 결론

본 논문에서는 MATLAB를 이용하여 FMCW레이더 신호처리 설계 및 모의실험을 수행하여 거리 및 속도를 검출하였으며, 실제 FMCW레이더 신호처리 상에서 거리 및 속도 검출에 사용되어지는 신호원인 가상 차주파수 신호를 생성하여 거리 및 속도에 따른 신호파형의 변화를 관찰 및 분석하였다.

실제 FMCW레이더 구현시 신호처리과정에 이를 적용하면 실제 차주파수 신호 분석과 거리 및 속도 검출시에 용이하게 사용되어질 것으로 기대한다.

호모다인 FMCW 레이더는 펄스 레이더와 다르게 연속적인 신호이므로 작은 송신출력으로도 같은 성능을 얻을 수 있고, 송신기에서 사용하는 동일한 발진기를 수신기에서도 사용함으로써 송수신기의 구조가 간단하여 저비용으로 구현 가능할 수 있는 장점이 있는 반면, 송수신 분리 문제, 발진기의 위상 잡음과 출력전력 크기의 변화 특성으로 인한 FM-AM 잡음 그리고 혼합기의 변환 손실, 선형 특성 등과 같은 고주파부(RF Front End)를 구성하고 있는 소자들의 성능 특성에 의해 수신단의 감도가 결정되기 때문에 각 소자의 성능을 개선할 수 있는 연구 개발이 병행되어야 할 것이다.[6]

### 참고문헌

- [1] 한국정보통신용어사전(<http://word.tta.or.kr/index.jsp>)
- [2] Joel Cooper, "A 50 MHz FMCW radar for the study of E-region coherent backscatter", University of Saskatchewan Saskatoon, 2006.
- [3] Jonathan G Hoole, "Implementation of a Low-cost FM-CW Radar", University of Stellenbosch, 2008.
- [4] 양기현, "TMS320C6713 DSK를 이용한 24GHz FMCW 레이더 신호처리 구현", 한국산업기술대학교 지식기반기술에너지대학원, 석사학위논문, 2008.
- [5] 정진현, "FMCW 레이더를 이용한 차량 충돌 방지 시스템의 신호처리부 설계 및 구현", 금오공과대학교대학원, 석사학위논문, 2002.
- [6] 한석균, "24GHz FMCW 레이더의 고주파부 설계 및 제작에 관한 연구", 목포해양대학교대학원, 박사학위논문, 2003.
- [7] 남병창 외, "24GHz 대역 CW 레이더 송수신기 설계", 한국산학기술학회논문지, 제10권 제7호 pp.1532-1535, 2009.
- [8] 임중수 외, "PRI 비교를 통한 주파수 급속변경 레이더 신호분리", 한국산학기술학회논문지, 제10권 제8

호 pp.1832-1838, 2009.

#### 김 정 연(Jeong-Yeon Kim)

[준회원]



- 2005년 2월 : 전북대학교 산업정보시스템공학과 학사졸업
- 2009년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 대학원 전자정보공학부 석사과정

<관심분야>

RADAR, 신호처리, Navigation, Robotics,

#### 정 길 도(Kil To Chong)

[정회원]



- 1984년 5월 : Oregon State University 기계공학 학사졸업
- 1986년 12월 : Georgia Institute of Technology 기계공학 석사졸업.
- 1993년 5월 : Texas A&M University 기계공학 박사 졸업.
- 1995년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 전자정보 교수

<관심분야>

Marine Navigation, Time-Delay, Robotics, 인공지능, Web 기술

#### 김 태 영(Tae-Yeong Kim)

[준회원]



- 2009년 2월 : 전북대학교 전자공학과 학사졸업
- 2009년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 대학원 전자정보공학부 석사과정

<관심분야>

Navigation, Robotics, Filtering