

코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 레이더를 이용한 이동표적의 고해상도 거리 추정 분석

Analysis of High Resolution Range Estimation for Moving Target Using Stepped Frequency Radar with Coherent Pulse Train

심재훈*, 배건성**★

Jae-Hun Sim*, Keun-Sung Bae**★

Abstract

A Stepped Frequency Radar(SFR) is a method that realizes high resolution range estimation by increasing the frequency of transmission pulses at regular intervals to generate a wide synthetic bandwidth. However, in the case of a moving target, accurate range estimation becomes difficult due to the range-Doppler coupling. In this paper, the process of high resolution range estimation by compensation of the range-Doppler coupling with estimated velocity of the moving target using the SFR waveform with Coherent Pulse Train(CPT) is analyzed and it was verified through simulation.

요약

계단 주파수 레이더는 송신 펄스의 주파수를 일정한 간격으로 증가시켜 넓은 합성 대역폭을 생성함으로써 고해상도 거리 추정을 구현하는 방식이다. 그러나 이동표적의 경우에는 거리-도플러 결합 현상으로 인해 정확한 거리 추정이 어렵게 된다. 본 논문에서는 초기에 코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 레이더 파형을 이용하여 이동표적의 속도를 추정하고, 거리-도플러 결합 현상을 보상함으로써 얻어지는 고해상도 거리 추정 과정을 분석하고, 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다.

Key words : Stepped Frequency Radar, Synthetic Bandwidth, Moving Target, range-Doppler coupling, CPT

1. 서론

계단 주파수 레이더(Stepped Frequency Radar : SFR)는 N 개의 송신펄스의 주파수를 일정한 주파수 Δf 간격으로 단계적으로 증가시킴으로써 표적으로부터 반사되어 수신된 신호를 레인지 빈(range

bin) 단위로 처리하는 과정에서 넓은 합성대역폭을 생성하여 고해상도 거리 추정이 가능한 방식이다 [1]~[3], [6]~[8], [10]. 그러나 이동표적의 경우에는 거리-도플러 결합 현상으로 인해 거리 추정 시 오차가 발생하게 된다[1]~[3]. 이를 해결하기 위해서는 이동표적의 속도를 추정하여 거리-도플러 결

* Hanwha Systems Co., Ltd.

** School of Electronics Engineering, Kyungpook National University

★ Corresponding author

E-mail : ksbae@ee.knu.ac.kr, Tel : +82-053-950-5527

Manuscript received Aug. 25, 2018; revised Sep. 15, 2018; accepted Sep. 18, 2018

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.

합 현상을 보상해주어야 하는데, 계단 주파수 레이더에서는 송신펄스의 주파수가 다르기 때문에 도플러 효과의 비선형적인 위상 특성으로 인해 속도 추정이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 초기에 동일한 송신주파수의 코히어런트 펄스열(Coherent Pulse Train : CPT)을 갖는 계단 주파수 레이더[1]를 이용하여 잡음을 고려한 환경에서 이동표적의 속도를 추정하고, 이를 이용하여 거리-도플러 결합 현상을 보상함으로써 고해상도 거리 추정을 얻는 과정을 분석하고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어서 II장에서는 코히어런트 펄스열을 갖는 계단주파수 레이더 파형의 신호 모델링 수식을 보이고, 이를 이용한 속도 추정, 도플러 보상 및 거리 추정 알고리즘을 설명한다. III장에서는 이동표적의 속도 추정 및 고해상도 거리 추정 실험결과를 제시하고, IV장에서 결론을 맺는다.

II. 코히어런트 펄스열을 갖는 계단주파수 레이더

1. 수신신호 모델링

코히어런트 펄스열을 갖는 SFR은 N_{CPT} 개의 코히어런트 펄스열과 N_{SFR} 개의 계단 주파수 파형 펄스로 구성되며, 먼저 도플러 주파수에 대해 선형적인 위상 특성을 갖는 코히어런트 펄스열을 이용하여 이동표적의 속도를 추정하고, 계단 주파수 파형으로 넓은 합성대역폭을 만들어 고해상도 거리를 추정한다. N_{CPT} 개 코히어런트 펄스의 수신신호 처리를 거쳐 표적의 해당 레인지 bin에서 얻어지는 신호는 식 (1)과 같이 표현된다[1], [4].

$$V(n)_{CPT} = A \cdot \exp\left(-j2\pi f_o \frac{2R_i}{c}\right) \cdot \exp\left(j2\pi f_o \frac{2v}{c} n T_p\right) \quad (1)$$

$$= A \cdot \exp(-j\phi) \cdot \exp(j2\pi f_d n T_p)$$

여기서 A 는 수신신호의 크기, f_o 는 송신주파수, R_i 는 초기 표적위치($i = 1, 2, 3, \dots$), c 는 전파의 속도($3 \times 10^8 m/s$), v 는 표적의 이동속도, n 은 코히어런트 파형의 펄스 수($0 \leq n \leq N_{CPT} - 1$), T_p 는 펄스 반복 주기(Pulse Repetition Interval: PRI), f_d 는 이동표적의 도플러 주파수, ϕ 는 상수 값이다.

잡음환경 고려를 위한 시계열 복소 잡음(complex

noise)은 평균값 0, 분산 1인 값을 갖는 가우시안 백색잡음을 모델링한 식 (2)를 사용하였다[5].

$$Noise(n)_{CPT} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [N_r(n) + jN_i(n)] \quad (2)$$

여기서 $N_r(n)$ 및 $N_i(n)$ 는 가우시안 랜덤 변수이다.

따라서 수신측 신호처리 후의 해당 레인지 bin에서의 신호는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(n)_{CPT} = V(n)_{CPT} + Noise(n)_{CPT} \quad (3)$$

한편, 코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 레이더에서 N_{SFR} 개의 계단 주파수 펄스열의 수신측 신호처리 후 레인지 bin 내의 샘플 신호, $V(m)_{SFR}$ 는 식 (4)와 같이 표현된다[6], [7]. 여기서 A' 는 수신신호의 크기, m 은 계단 주파수 파형의 펄스 수($0 \leq m \leq N_{SFR} - 1$), Δf 는 계단 주파수 증가분이다.

$$V(m)_{SFR} = A' \cdot \exp\left(-j2\pi(f_o + m\Delta f) \frac{2R_i}{c}\right) \quad (4)$$

$$\cdot \exp\left(j2\pi(f_o + m\Delta f) \frac{2v}{c} m T_p\right)$$

따라서 수신측 신호처리 후의 해당 레인지 bin에서 얻어지는 계단 주파수 파형 펄스열(SFR) 신호는 식 (2)를 이용한 잡음을 고려하면 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$S(m)_{SFR} = V(m)_{SFR} + Noise(m)_{SFR} \quad (5)$$

2. 도플러 보상 및 이동표적의 거리 추정

코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 레이더에서 이동표적에 대한 속도 추정, 도플러-거리 결합 보상 및 거리 추정 과정을 요약하면 그림 1과 같다. 수신측 신호처리 과정을 거친 초기 코히어런트 펄스열 신호 $S(n)_{CPT}$ 에 Hamming window를 적용한 후 이산 푸리에 변환(DFT) 과정을 통해 이동표적의 속도를 추정한다. 이때 Hamming window는 스펙트럼의 피크 값을 구할 때 side lobe를 작게 만들어 주기 위해 사용된다. 그 다음 계단 주파수 파형의 펄스열 신호, $S(m)_{SFR}$ 에 Hamming window를 적용한 후, 코히어런트 펄스열(CPT)에 의해 추정

된 속도 값을 이용하여 이동표적의 도플러 속도를 보상하고, 역 이산 푸리에 변환(IDFT)을 통해 이동표적에 대한 고해상도 거리 추정을 수행한다.

코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 레이더에서 이동표적의 속도를 추정하기 위한 코히어런트 펄스열 수신신호, $V(n)_{CPT}$ 의 신호처리 파라미터 관계식은 다음과 같다. 송신 주파수가 f_0 일 때

$$R_u = \frac{cT_p}{2} \tag{7.1}$$

$$R_{bin} = \frac{c}{2\Delta f} \tag{7.2}$$

$$R_{res} = \frac{c}{2N_{SFR} \Delta f} \tag{7.3}$$

III. 실험 및 검토

코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 레이더에서 이동표적 탐지 시 수신신호의 신호 대 잡음비(Signal to Noise : SNR)를 고려한 표적의 속도 추정 및 고해상도 거리 추정 결과를 분석하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 실험에 사용된 레이더 파라미터 값은 표 1과 같다. 송신 주파수는 일반적으로 차량용 레이더에서 주로 사용하는 76GHz을 사용하였으며, 이동표적은 3개의 하이라이트 점을 갖는다고 가정하고 초기 scatterer의 위치는 1157m, 1160m, 1163m로 수신된 반사 신호의 파워는 각각 0.2 : 1 : 0.5로 다르게 설정하였다.

표 2는 주어진 조건에서 식 (6), (7)을 이용하여 구한 이동표적의 최대 도플러 주파수, 추정 가능한 최대 속도 범위, 속도 해상도, 최대 탐지가능 거리, 레인지 빈 크기, 거리 분해능 등을 구한 결과를 보인 것이다. 레인지 빈의 크기가 150m이므로 표적은 8번째 빈에 해당되는 1050m ~ 1200m에 존재하게 된다.

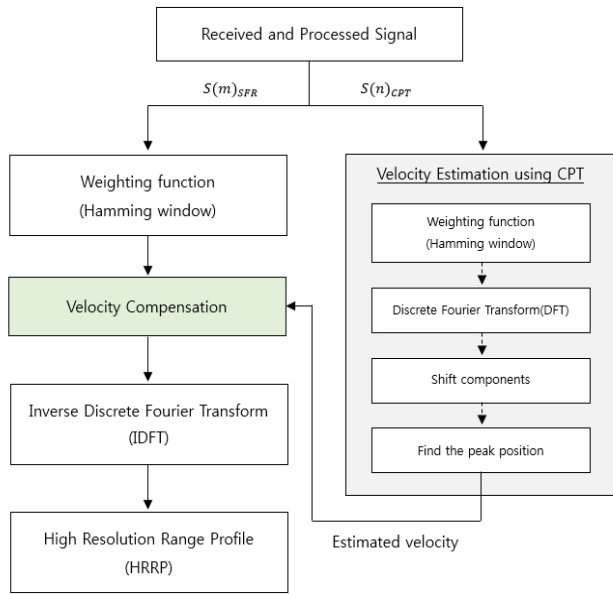


Fig. 1. High resolution range estimation procedure for moving target in SFR with coherent pulse train.
 그림 1. 코히어런트 펄스열을 갖는 SFR에서 이동표적의 고해상도 거리추정 절차

이동표적의 도플러 주파수(f_d), 속도(v), 추정 가능한 최대 속도 값(V_{max}), 속도 해상도(V_{res})의 관계식은 각각 식 (6)과 같이 표현된다[1],[9].

$$f_d = \frac{2v}{c} f_0 \tag{6.1}$$

$$f_{d_{max}} = \frac{F_p}{2} \tag{6.2}$$

$$V_{max} = \frac{c f_{d_{max}}}{2f_0} \tag{6.3}$$

$$V_{res} = \frac{2V_{max}}{N_{DFT}}, N_{DFT} : DFT \text{ point 수} \tag{6.4}$$

그리고 계단 주파수 펄스열 수신신호, $V(m)_{SFR}$ 을 이용한 최대 비모호성 거리(R_u), 레인지 빈(R_{bin})의 크기 및 거리 분해능(R_{res})은 식 (7)과 같이 구할 수 있다[7].

Table 1. Radar parameter values used in the experiments.
 표 1. 실험에 사용된 레이더 파라미터 값

| Parameter | Value |
|--|---------------------|
| Carrier Frequency (f_0) | 76GHz |
| Frequency Step Size (Δf) | 1MHz |
| Number of pulses for SFR (N_{SFR}) | 512 |
| Number of pulses for CPT(N_{CPT}) | 8 |
| Pulse Repetition Interval (T_p) | 10usec |
| Pulse Width (τ) | 1usec |
| Range of Scatterers(R_i) | 1157m, 1160m, 1163m |
| Power Ratio of Scatterer 1, 2, 3 | 0.2 : 1 : 0.5 |
| Signal to Noise Ratio(SNR) | 35dB |
| Velocity of Scatterers (v) | +50m/s |
| N -point IDFT | 512 |

Table 2. Velocity and range related parameter values.

표 2 속도 및 거리 관련 파라미터 값

| Parameter | Calculated Parameter Value |
|--|-----------------------------------|
| Max Doppler Frequency($f_{d_{max}}$) | 50kHz |
| Maximum Velocity(V_{max}) | 98,6842m/s ($\approx 355km/h$) |
| Velocity Resolution(V_{res}) | 0.3855 m/s ($\approx 1.39km/h$) |
| Maximum Unambiguous Range(R_u) | 1500m |
| Range Bin Size (R_{bin}) | 150m |
| Range Resolution(R_{res}) | 0.293m |

그림 2는 이동속도가 $v = 0m/s$ 인 경우를 가정했을 때의 초기 scatterers의 위치 추정 결과를 보인 것이다. 추정된 각 scatterer의 위치는 1156.93m, 1159.86m, 1163.09m로 초기 scatterer의 위치 대비 정확하게 추정됨을 볼 수 있다.

그림 3은 표적의 이동속도가 레이더 방향으로 $v = +50m/s$ 일 때의 scatterers의 추정된 초기 위치와 $v = 0m/s$ 인 경우를 함께 보인 것이다. 거리-도플러 결합 현상으로 인해 원래의 초기 위치에서 약 40m 오차가 발생하여 약 1120m 부근에 scatterers가 나타남을 볼 수 있다.

이동표적의 속도가 $v = +50m/s$ 일 때의 코히어런트 펄스열을 이용한 속도 추정 결과를 그림 4에 나타내었다. 추정된 속도 값(V_{est})은 $+50.11m/s$ 로 표 2에 주어진 속도 해상도 $0.3855m/s$ 범위 내에서 정확한 값이 얻어짐을 볼 수 있다.

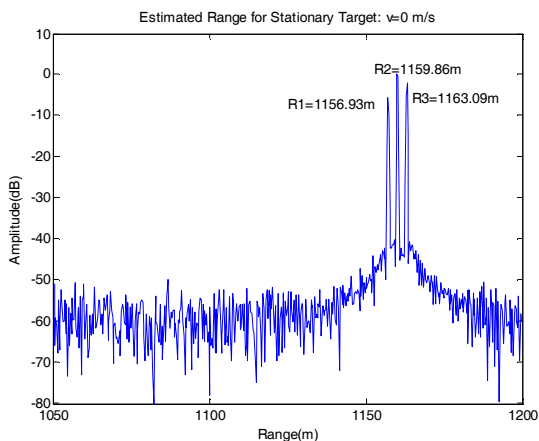


Fig. 2. Estimated range for a stationary target($v = 0m/s$).
그림 2. 고정표적의 거리추정 결과($v = 0m/s$)

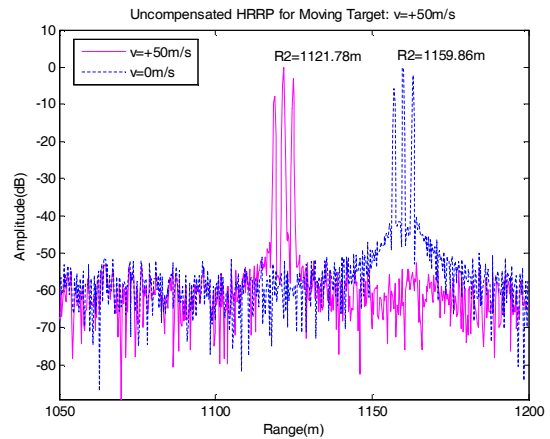


Fig. 3. Estimated range for a moving target.
그림 3. 이동표적의 거리추정 결과

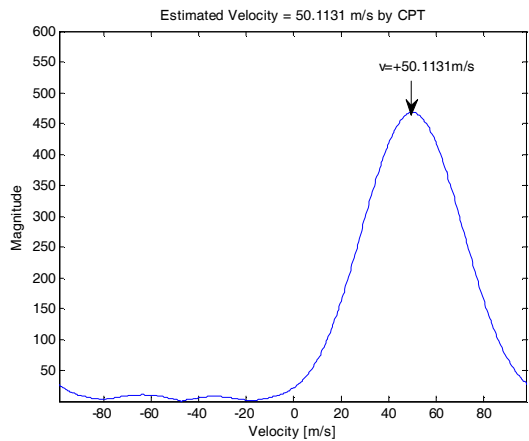


Fig. 4. Estimated velocity of a moving target($v = +50m/s$).
그림 4. 이동표적($v = +50m/s$)의 속도추정 결과

그림 3에서 거리-도플러 결합으로 거리 추정 오차가 발생한 경우에 그림 4에서 추정된 속도 값을

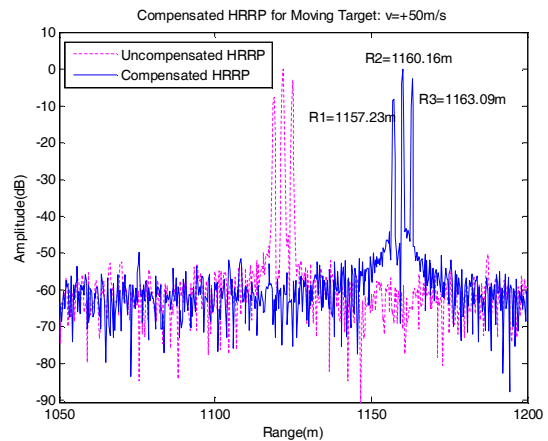


Fig. 5. High resolution range estimation for a moving target before/after velocity compensation.
그림 5. 이동표적의 속도보상 전/후의 고해상도 거리 추정

이용하여 이동표적의 도플러 속도를 보상한 후 고 해상도 거리를 추정한 결과는 그림 5에 나타내었다. 도플러 보상 후 추정된 이동표적 각 scatterer의 값은 1157.23m, 1160.16m, 1163.09m로 초기 scatterer의 위치 대비 정확하게 추정됨을 확인할 수 있다.

그림 6은 신호 대 잡음비(SNR)를 5~50dB 범위에서 0.05dB 간격으로 변화시키면서 코히어런트 펄스열을 이용한 속도 추정 값(V_{est})을 보인 것이다. SNR이 약 35dB 이상에서는 속도 추정 값이 +50.11m/s로 일정한 값을 가지지만, SNR이 낮아질수록 표 2의 속도 추정 해상도 0.3855m/s 만큼씩 추정 오차가 발생할 수 있음을 보여준다.

그림 7은 이동표적의 $R_2 = 1160m$ scatterer 대해 속도 추정 값(V_{est})과 계단주파수 파형의 펄스열 신호처리 과정에서 V_{est} 을 사용하여 도플러 속도를 보상한 거리 추정 결과를 보인 것이다. 속도 해상도에 의한 0.3855m/s 속도 추정 오차가 거리 추정에 미치는 결과를 보여준다. 이러한 분석 과정은 레이더 시스템 설계 시에 적절한 신호 전력 및 고 해상도 거리 추정 정확도의 사양을 결정하는데 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

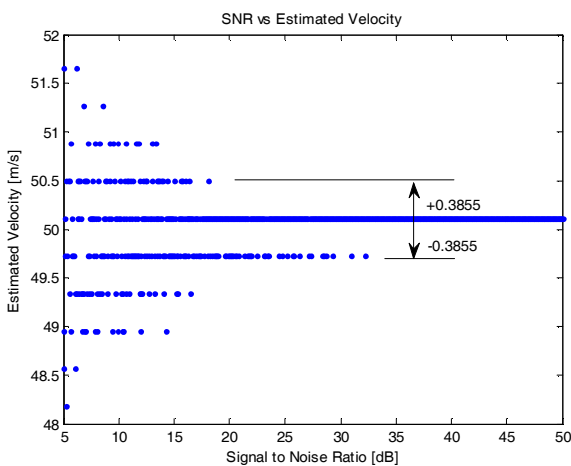


Fig. 6. Distribution chart of estimated velocity for a moving target in accordance with SNR.

그림 6. SNR에 따른 이동표적의 속도 추정 값 분포도

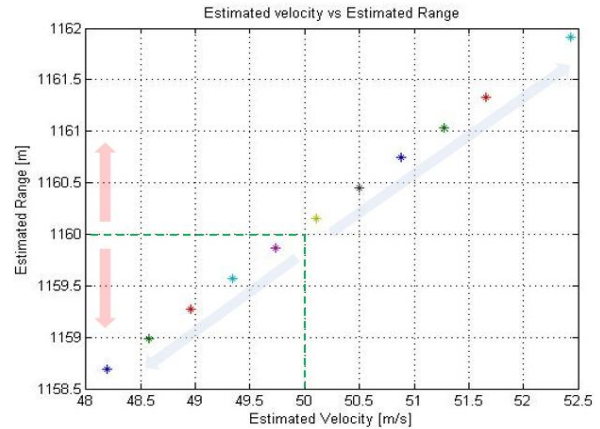


Fig. 7. Range estimation result for a moving target in accordance with estimated velocity

그림 7. 이동표적의 속도 추정 값에 따른 거리추정 결과

IV. 결론

코히어런트 펄스열을 갖는 계단주파수 레이더에서 이동표적에 대한 속도 추정 시 도플러 주파수에 선형적인 위상 특성을 갖는 CPT 방식을 이용하여 이동표적의 속도를 정확히 추정하고, 그 추정된 속도를 사용하여 거리-도플러 결함 현상을 보상함으로써 고해상도 거리 추정 결과를 얻는 과정을 분석하고 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다. 또한 수신신호의 SNR 값이 속도 추정 및 거리 추정 결과에 미치는 영향을 분석하여 시스템 설계 시에 요구되는 속도 및 거리 추정 정확도의 사양을 검증할 수 있음을 보였다.

References

[1] J. H. Sim and K. S. Bae, "Coherent Pulse Train Based Velocity Estimation and Compensation for High Resolution Range Profile of Moving Target in Stepped Frequency Radar," *j.inst.korean.electr.electron.eng*, Vol.22, No.2, pp.309-315, 2018. DOI:10.1016/j.sigpro.2011.04.022

[2] Gang Li, Huadong Meng, Xiang-Gen Xia and Ying-Ning Peng, "Range and Velocity Estimation of Moving Targets Using Multiple Stepped-frequency Pulse Trains," *Sensors 2008*, pp.1343-1350, 2008. DOI:10.3390/s8021343

- [3] Thomas Feuillen, Achraf Mallat and Luc Vandendorpe, "Stepped Frequency Radar for Automotive Application: Range-Doppler Coupling and Distortions Analysis," *Milcom 2016 Track 1, Waveforms and Signal Processing*, 2016.
DOI:10.1109/MILCOM.2016.7795443
- [4] J. H. Sim and K. S. Bae, "Analysis of DFT Based Velocity Estimation Method for Moving Target in Pulsed Radar," *JCCI 2018, The 28th Joint Conference on Communications and Information*, p.55, 2018.
- [5] Mathuranathan Viswanathan, "How to generate AWGN noise in Matlab/Octave(without using in-built awgn function)," https://www.gaussianwaves.com/gaussianwaves/wp-content/uploads/2015/06/How_to_generate_AWGN_noise.pdf.
- [6] J. H. Sim and K. S. Bae, "A Study on the Method of Moving Target Velocity Estimation through Doppler Analysis in Stepped Frequency Radar," *2017 IEIE Academic Symposium*, pp. 21-22, 2017.
- [7] C. Fukushima and N. Hamada, "A Study on Stepped Frequency Radar by using Intra-Pulse Phase Coded Modulation," *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2008.
- [8] Yimin Liu, Tianyao Huang, Huadong Meng, XiqinWang, "Fundamental Limits of HRR Profiling and Velocity Compensation for Stepped-Frequency Waveforms," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.62, No.17, pp.4490-4504, 2014.
DOI:10.1109/TSP.2014.2337279
- [9] Mark A. Richards, "*Fundamentals of Radar Signal Processing*," Second Edition, McGraw-Hill, New York, 2014.
- [10] J. H. Sim, S. W. Hyung, S. M. Park and K. S. Bae, "A Study on the Range Estimation of Moving Target with Stepped Frequency Radar," *2016 IEIE Fall Conference*, pp.357-358, 2016.

BIOGRAPHY

Jae-Hun Sim (Member)



2002 : BS degree in Electronics Engineering, Kumoh National Institute of Technology.
2009 : MS degree in Electronics Engineering, Kyungpook National University.

2015~ : Research Engineer, Hanwha Systems.

Keun-Sung Bae (Corresponding author)



1977 : BS degree in Electronics Engineering, Seoul National University.
1979 : MS degree in Electrical Engineering, KAIST.
1989 : PhD degree in Electrical Engineering, University of Florida.

1979~ : Professor, School of Electronics Engineering, Kyungpook National University.