

지능형 차량을 위한 후방 감시용 레이더 신호 처리 기법에 관한 연구

A Study on Signal Processing of Rear Radars for Intelligent Automobile

최각규 · 한승구 · 김효태 · 김경태

Gak-Gyu Choi · Seung-Ku Han · Hyo-Tae Kim · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문은 도로상의 차량용 지능형 후방 감시를 위한 레이더의 신호 처리 기법에 관하여 소개한다. 주파수 변조 연속 파형(Frequency Modulation Continuous Wave: FMCW) 신호에 주파수 편이(Frequency Shift Keying: FSK) 변조 방식을 결합한 선형 주파수 변조-주파수 편이(Linear Frequency Modulation-Frequency Shift Keying, LFM-FSK) 신호를 차량의 차로 변경 보조 장치에 적용하여 도로 상의 차량의 거리 및 각도와 속도를 추정할 수 있다. 또한 이 신호는 후방 차량 감시에 용이하게 사용할 수 있다. FMCW 신호는 높은 거리 분해능을 가지는 장점이 있지만, 다중 표적 상황에서 고스트 표적이 발생하는 문제점이 있다. 또한 FSK 신호는 높은 속도 분해능을 가지며 고스트 현상을 피할 수 있지만, 레이더의 가시선 방향에 다중 표적이 존재할 때 구분하지 못하는 문제점이 있다. LFM-FSK 신호를 이용하면 다중 표적 상황에서 높은 거리 분해능과 속도 분해능을 가지면서 고스트 발생의 문제를 완벽히 해결할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 위의 LFM-FSK 신호가 차량의 차선 변경 보조장치 적용에 적합함을 보여준다.

Abstract

This paper introduces a radar signal processing technique for intelligent rear view monitoring of an automobile. The linear frequency modulation-frequency shift keying(LFM-FSK) waveform, which is the combination of frequency modulation continuous wave(FMCW) and frequency shift keying(FSK) waveform, is employed to simultaneously estimate the range, relative aspect angle, and velocity of an automobile. Hence, it can be applied to monitor the rear view of an automobile. FMCW waveform has high range resolution capability, but it produces ghost targets under a multiple target environment. In contrast, FSK waveform can provide high velocity resolution and avoids the problem of ghost targets. However, it fails to identify multiple targets along the radar's line of sight. With LFM-FSK waveform, we can estimate the ranges and velocities of multiple targets with very high resolution, which avoids the ghost target problem of an FMCW waveform. Simulation result shows that LFM-FSK waveform is suitable for use in the lane change assistance system for an automobile.

Key words : Automotive Radar, FMCW, FSK, Waveform Design

I. 서 론

오늘날 레이더를 이용한 자동차간 거리 조절 장

「이 연구는 (주)SL과 2011년도 두뇌 한국 21 사업에 의하여 지원되었음.」

포항공과대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· 논문 번호 : 20110805-082

· 교신저자 : 김경태(e-mail : kkt@postech.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 10월 4일

치 (Adaptive Cruise Control: ACC) 시스템은 차량에 폭 넓게 적용되고 있다. 이러한 시스템에 레이더를 사용하는 가장 큰 목적은 도로 상에 존재하는 표적의 거리와 속도를 동시에 알아내어 운전자의 안전한 주행을 도와 주는 것이다. 또한 이러한 시스템과 유사한 후방 감지 시스템에 레이더를 이용하여 운전자가 인지하기 어려운 사각지대의 물체의 존재 유무를 알려주는 사각 지대 감시(Blind Spot Detection: BSD) 시스템과 레이더의 감시 거리에 차량이 출현했을 경우 차량을 탐지하고 거리와 상대 속도를 알려줌으로써 사고를 미연에 방지할 수 있는 차선 변경 보조 장치(Lane Change Assistance: LCA) 시스템에 적용할 수 있다.

이러한 후방 감지 시스템의 요구 사항을 충족시키기 위해서는 다양한 신호 파형들이 필요하다. 계산의 복잡도가 작아 이미 여러 분야에 많이 쓰이고 있는 FMCW 파형과 FSK 파형은 차량의 지능형 후방 감시용 레이더 신호 처리에도 적용되어 쓰이고 있다. FMCW 파형은 선형 주파수 변조(LFM)를 사용하며 FSK 파형은 2개 이상의 이산적인 송신 주파수를 사용한다. 하지만 FMCW 파형은 하나의 표적의 거리와 속도를 추정하는 데는 문제가 없지만 다중 표적 상황시 각 표적의 거리와 속도를 추정하기가 매우 어렵다. 이를 해결하기 위해서는 표적의 수만큼 FMCW 파형의 개수를 늘려야 하며, 고스트 표적을 제거하여야 한다. 그러므로 이러한 고스트 표적을 제거하기 위해 추가적인 신호 처리가 뒤따라야 하며, 파형을 여러 개 사용함으로써 송수신시간 및 신호 처리 계산량이 늘어 실시간 처리에 문제가 발생할 수 있다. FSK 파형 역시 레이더의 하나의 가시선에 두 개 이상의 표적이 존재하면 구분이 불가능하다는 단점을 지니고 있다^{[1]~[3]}.

본 논문에서는 위의 두 파형이 가진 단점을 극복할 수 있는 LFM-FSK 신호 파형과 그 응용에 대해 연구하였다. 다중 표적 상황에서 각 표적의 거리와 속도를 얻어낼 수 있는 LFM-FSK 신호 파형은 FMCW 파형과 FSK 파형의 조합으로 만들어진다^{[4]~[8]}. 이러한 LFM-FSK 신호 파형을 이용하면 다중 표적 상황시 BSD와 LCA에 보다 효율적으로 적용할 수 있다. II장에서는 LFM-FSK 파형의 신호 처리 기법에 대하여 소개한다. III장은 LFM-FSK 파형을 이용

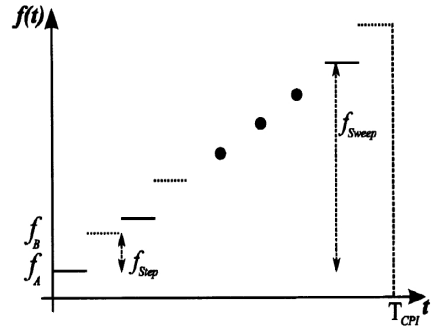


그림 1. LFM-FSK 신호 파형(T_{CPI} : 시간 간격 길이, f_{sweep} : 대역폭)^[5]
 Fig. 1. LFM-FSK waveform(T_{CPI} : coherent processing interval, f_{sweep} : bandwidth)^[5].

하여 도출한 시뮬레이션 결과를 보여주며, IV장은 결론을 나타낸다.

II. 신호 처리 기법 연구

FMCW 신호에 FSK 변조 방식을 적용한 신호 파형이 그림 1과 같은 LFM-FSK 신호이다. 두 개의 선형 주파수 변조 up-chirp 신호의 조합으로 이루어진 순차 주파수 변조(stepwise frequency modulated) 송신 신호가 구성된다. 두 chirp 신호가 서로 교차되어 송신되며, 각각의 chirp 신호는 f_{step} 만큼의 주파수 천이를 보이며 동일한 대역폭과 기울기를 가진다.

표적에 의해 반사된 수신 신호를 기저 대역으로 변환(baseband conversion)하고 주파수 스텝의 끝에서 표본 신호를 얻는다. 그림 2와 같은 신호 처리 과정을 거쳐 두 개의 chirp 신호의 표본 신호로 얻은 두 개의 교차된 신호열을 푸리에 변환(Fourier transform)을 통하여 분리해 낼 수 있다.

푸리에 변환을 통해 신호열의 스펙트럼을 분석하면 특정한 거리에 있는 특정 속도의 단일 표적의 신호 A와 B 모두 같은 주파수 인덱스 $\kappa = \kappa_A = \kappa_B$ 에서 피크값이 나타난다. 이 주파수 인덱스는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다^{[6],[8]}.

$$\kappa = \frac{v_0}{\Delta v} - \frac{R_0}{\Delta R} \quad (1)$$

여기서 v_0 는 표적의 속도, Δv 는 속도 분해능, R_0 는 표적의 초기 위치, ΔR 은 거리 분해능을 나타낸다.

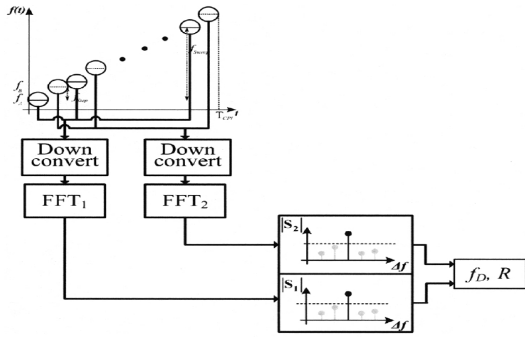


그림 2. LFM-FSK 신호 처리 과정^[5]
 Fig. 2. LFM-FSK signal processing^[5].

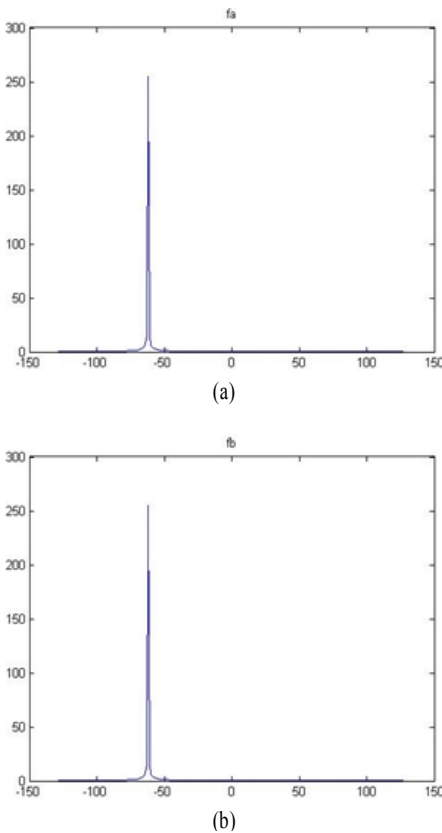


그림 3. 거리 75 m, 속도 108 km/h인 표적의 두 신호열의 주파수 인덱스
 Fig. 3. The frequency index respectively when target's range and velocity are 75 m and 108 km/h.

($\Delta v = \frac{\lambda}{2T_{CPI}}$, $\Delta R = \frac{c}{2f_{sweep}}$, λ 는 파장의 길이, c 는 빛의 속도를 나타낸다.)

한 예로 레이더로부터 75 m 떨어져 있고 108

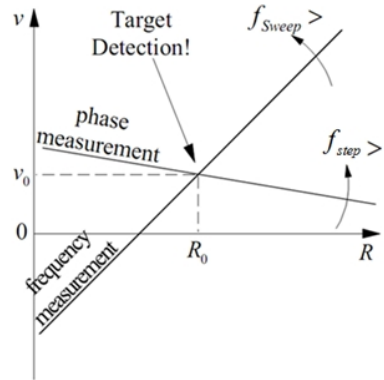


그림 4. 거리 \$R\$ - 속도 \$v\$ 다이어그램^[6]
 Fig. 4. Range (\$R\$) - velocity (\$v\$) diagram^[6].

km/h의 속도를 가진 단일 표적의 신호열 A와 B의 스펙트럼을 보면 그림 3과 같이 A와 B 둘 다 주파수 인덱스 -62에서 피크값을 얻을 수 있다.

이 신호열 A와 B의 각각의 스펙트럼의 위상 ϕ_A 와 ϕ_B 에도 표적의 거리와 속도 정보가 들어있다. 두 표적의 위상차 $\Delta\phi$ 는 거리 R_0 와 속도 v_0 의 관계로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다^{[6],[8]}.

$$\Delta\phi = \arg\left(\frac{S(\kappa_B)}{S(\kappa_A)}\right) = \frac{\pi}{N-1} \frac{v_0}{\Delta v} - 4\pi R_0 \frac{f_{step}}{c} \quad (2)$$

위의 주파수 인덱스와 신호열 A와 B의 스펙트럼의 위상차를 이용하여 각 표적까지의 거리와 상대적인 속도를 추정할 수 있다. 식 (1)과 (2)는 R_0 와 v_0 에 대한 2원 1차 연립방정식이고, 추정하려는 거리와 상대 속도는 그림 4와 같은 $R-v$ 다이어그램에서 주파수 인덱스 측정으로 얻어진 직선과 위상 측정으로 얻어진 직선의 교차점과 같다.

위의 식 (1)과 (2)로부터 i 번째 표적의 거리와 상대적인 속도를 아래와 같은 식 (3)과 (4)로 얻을 수 있다^{[6],[8]}.

$$R_i = \frac{c\Delta R((N-1)\Delta\phi_i - \pi\kappa_i)}{\pi(c - 4(N-1)f_{step}\Delta R)} \quad (3)$$

$$v_i = \frac{(N-1)\Delta v(c\Delta\phi_i - 4\pi f_{step}\Delta R\kappa_i)}{\pi(c - 4(N-1)f_{step}\Delta R)} \quad (4)$$

상대 차량과의 각도를 추정하기 위해서 위상 비

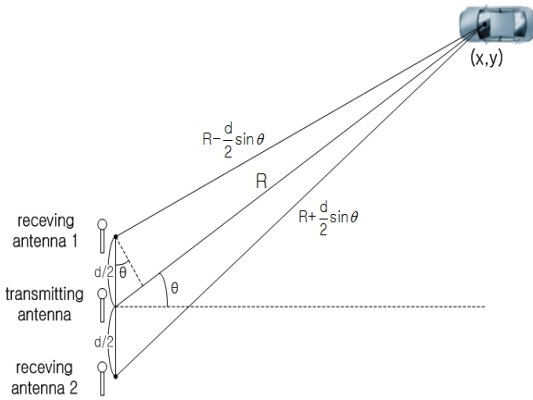


그림 5. 두 안테나에서 수신되는 신호의 위상 차이
Fig. 5. Phase difference of received signal in two antenna.

교 모노 펄스(phase comparison monopulse) 방식을 사용하였다. 한 개의 송신 채널과 두 개의 수신 채널을 가정하여 그림 5와 같이 두 개의 안테나가 d 만큼 떨어져 있을 때 수신되는 신호의 위상 차이는 표적까지의 거리 R 이 안테나 사이의 거리 d 보다 현저히 크므로 식 (5)와 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_1 &\approx 2R - \frac{d}{2} \sin\theta \\ r_2 &\approx 2R + \frac{d}{2} \sin\theta \\ \Rightarrow \Delta\phi &= \frac{2\pi}{\lambda} |r_2 - r_1| = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta \\ \Rightarrow \theta &= \arcsin\left(\frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi d}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 r_1 은 1번 안테나에서 표적까지의 송수신한 거리, r_2 는 2번 안테나에서 표적까지의 송수신한 거리, R 은 두 개의 안테나 사이의 중점에서 표적까지의 거리, $\Delta\phi$ 은 각각의 안테나에서 수신된 신호의 위상 차이, λ 는 중심 파장, θ 는 안테나 사이의 중점에서 표적까지의 각도이다.

주파수 인덱스 κ 와 스펙트럼의 위상차를 반사 신호로부터 풀어난 식 (3)과 (4)에 적용하여 레이더부터 표적까지의 거리 R_0 와 가시선 방향 속도 v_r 를 알아낼 수 있다. 또한 두 개의 안테나의 위치에 따른 위상 차이를 이용한 식 (5)를 통해 레이더와 표적과의 각도를 θ 가 추정 가능하다. 그림 6은 시뮬레이션 상황을 도식화한 것이며, 시뮬레이션에서 구한 거리와 각도를 이용하면 식 (6)과 같이 표적의 수평 거

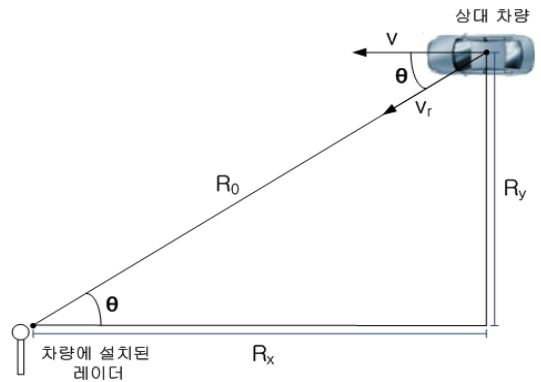


그림 6. 상대 차량의 위치 및 속도 추정
Fig. 6. Estimation of target vehicle's range and velocity.

리 R_x , 수직 거리 R_y , 표적의 속도 v 를 추정할 수 있다.

$$R_x = R_0 \cos\theta, R_y = R_0 \sin\theta, v = \frac{v_r}{\cos\theta} \quad (6)$$

III. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 본 연구에서 제안하는 신호 파형이 BSD와 LCA에 얼마나 적합한지를 알아보는 점산란체(point scatterer) 시뮬레이션 결과를 기술하고 잡음(noise)이 존재할 때 이 신호 처리 기법의 성능을 분석하였다.

3-1 BSD 시뮬레이션

본 연구에서 가정한 BSD 상황은 그림 7에 나타나 있으며, 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

표 1과 같은 조건에서 식 (3)~(5)를 이용하여 표적의 거리와 속도, 각도를 추정하면 표 2와 같은 결과를 얻을 수 있다.

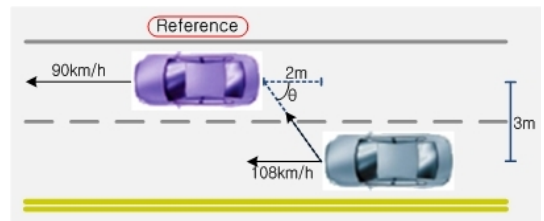


그림 7. BSD 시뮬레이션 상황
Fig. 7. BSD simulation situation.

표 1. 시뮬레이션 조건

Table 1. Simulation condition.

중심 주파수	24 GHz
대역폭	150 MHz
펄스폭	2.75 ms
주파수 스텝	-293 kHz
주파수 분할수	256
거리	3.6 m
수평 거리	2.0 m
수직 거리	3.0 m
레이더 플랫폼의 속도	90 km/h
표적의 속도	108 km/h
각도	-56.3°

표 2. LFM-FSK 신호처리를 통한 상대 차량의 위치 및 속도 추정 결과

Table 2. Estimation result of target vehicle's range and velocity using LFM-FSK signal processing.

변수	실제값	추정치
가시선 거리	3.6 m	3.4 m
수평 거리	2.0 m	1.9 m
수직 거리	3.0 m	2.8 m
속도	108 km/h	110 km/h
각도	-56.3°	-56.7°

표 2의 결과에서 볼 수 있듯이 표적의 거리, 속도, 각도를 정확히 추정할 수 있어 LFM-FSK 파형이 BSD 시스템에 적용 가능하다는 것을 판단할 수 있다.

3-2 LCA 시뮬레이션

본 연구에서 가정한 LCA 상황은 그림 8에 나타나 있으며, 시뮬레이션 조건은 표 3과 같다.

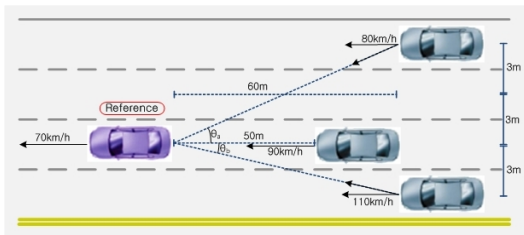


그림 8. LCA 시뮬레이션 상황
Fig. 8. LCA simulation situation.

표 3. 시뮬레이션 조건

Table 3. Simulation condition.

중심 주파수	24 GHz
대역폭	150 MHz
펄스폭	2.75 ms
주파수 스텝	-293 kHz
주파수 분할수	256
거리	50.0 m, 60.1 m, 60.3 m
수평 거리	50.0 m, 60.0 m, 60.0 m
수직 거리	0.0 m, 3.0 m, 6.0 m
레이더 플랫폼의 속도	70 km/h
표적의 속도	90 km/h, 110 km/h, 80 km/h
각도	0°, -2.9°, 5.7°

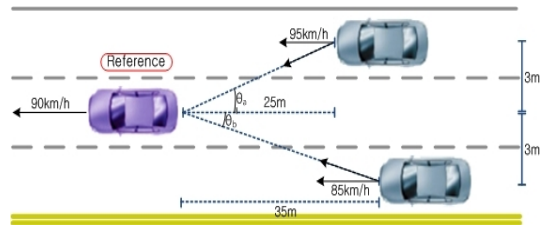


그림 9. LCA 시뮬레이션 상황
Fig. 9. LCA simulation situation.

표 3과 같은 조건에서 식 (3)~(5)를 이용하여 표적의 거리와 속도, 각도를 추정하면 표 5와 같은 결과를 얻을 수 있다.

또한 레이더 플랫폼의 속도와 상대 차량의 속도의 차이가 크지 않은 상황을 가정하여 시뮬레이션을 실행하였다. 이러한 LCA 상황은 그림 9에 나타나 있으며, 시뮬레이션 조건은 표 4와 같다.

표 4와 같은 조건에서 식 (3)~(5)를 이용하여 표적의 거리와 속도, 각도를 추정하면 표 6과 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 5와 표 6의 결과에서 볼 수 있듯이 표적의 거리, 속도, 각도를 정확히 추정할 수 있어 LFM-FSK 파형이 LCA 시스템에 적용 가능하다는 것을 판단할 수 있다.

3-3 잡음(Noise)의 영향

잡음이 존재할 때 시뮬레이션 기법의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 신호 대 잡음비(SNR)을 변

표 4. 시뮬레이션 조건

Table 4. Simulation condition.

중심 주파수	24 GHz
대역폭	150 MHz
펄스폭	2.75 ms
주파수 스텝	-293 kHz
주파수 분할수	256
거리	25.2 m, 35.1 m
수평 거리	25.0 m, 35.0 m
수직 거리	3.0 m, 3.0 m
레이더 플랫폼의 속도	90 km/h
표적의 속도	95 km/h, 85 km/h
각도	6.8°, -4.9°

표 5. LFM-FSK 신호처리를 통한 상대 차량의 위치 및 속도 추정 결과

Table 5. Estimation result of target vehicle's range and velocity using LFM-FSK signal processing.

변수(표적 A)	실제값 A	추정치 A
가시선 거리	50.0 m	50.0 m
수평 거리	50.0 m	50.0 m
수직 거리	0.0 m	0.1 m
속도	90 km/h	89 km/h
각도	0.0°	0.2°
변수(표적 B)	실제값 B	추정치 B
가시선 거리	60.1 m	60.0 m
수평 거리	60.0 m	59.9 m
수직 거리	3.0 m	3.0 m
속도	110 km/h	111 km/h
각도	-2.9°	-2.9°
변수(표적 C)	실제값 C	추정치 C
가시선 거리	60.3 m	60.2 m
수평 거리	60.0 m	59.9 m
수직 거리	6.0 m	5.7 m
속도	80 km/h	80 km/h
각도	5.7°	5.4°

화시키면서 잡음이 섞인 시뮬레이션에 의한 추정값과 실제값의 차이의 평균과 분산을 1,000회의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통하여 알아보았으며, 그 결과는 그림 10과 그림 11에 나타나 있다.

표 6. LFM-FSK 신호처리를 통한 상대 차량의 위치 및 속도 추정 결과

Table 6. Estimation result of target vehicle's range and velocity using LFM-FSK signal processing.

변수(표적 A)	실제값 A	추정치 A
가시선 거리	25.2 m	25.3 m
수평 거리	25.0 m	25.1 m
수직 거리	3.0 m	3.1 m
속도	95 km/h	93 km/h
각도	6.8°	7.0°
변수(표적 B)	실제값 B	추정치 B
가시선 거리	35.1 m	35.2 m
수평 거리	35.0 m	35.0 m
수직 거리	3.0 m	2.8 m
속도	85 km/h	83 km/h
각도	-4.9°	-4.6°

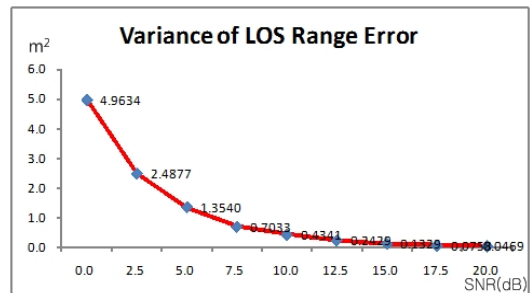
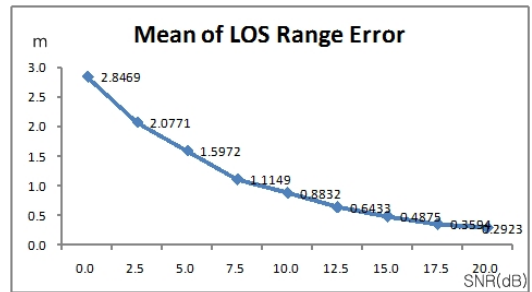


그림 10. SNR의 변화에 따른 가시선 거리 에러의 평균과 분산

Fig. 10. Mean and variance of error in the estimated radar line of sight range vs. SNR.

시뮬레이션 조건의 거리 분해능 $\Delta R = 1.0$ m, 속도 분해능 $\Delta v = 8$ km/h이므로 거리, 속도의 정확한 추정을 위해서는 10 dB 이상의 SNR이 요구된다.

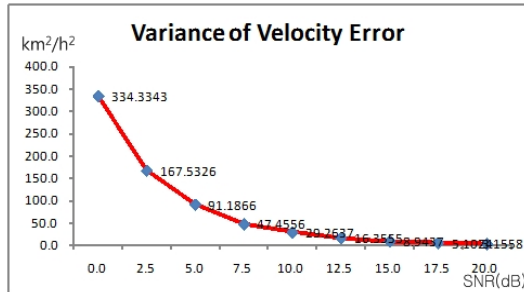
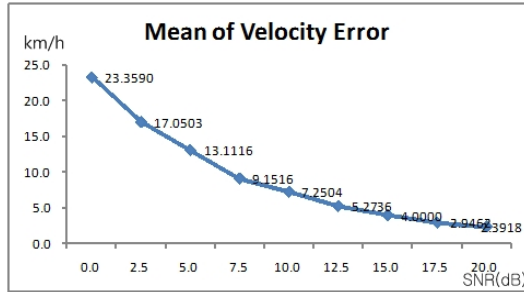


그림 11. SNR의 변화에 따른 속도 에러의 평균과 분산

Fig. 11. Mean and variance of error in the estimated velocity vs. SNR.

IV. 결 론

FMCW 신호와 FSK 신호가 조합된 LFM-FSK 파형을 이용하여 다중 표적에 대한 거리와 속도를 정확하게 추정할 수 있다. LFM-FSK 신호를 사용함으로써 표적이 다수 존재할 때 FMCW 신호가 가지는 고스트가 생기는 단점과 FSK 신호가 가지는 가시선 방향에 두 개 이상이 표적이 들어왔을 때 표적을 구분하지 못하는 단점을 완벽하게 극복해낼 수 있다. 또한 LFM-FSK 신호는 신호 처리 과정이 상대적으로 단순하여 차량용 레이더 시스템으로써 좋은 성능을 낼 수 있다. 시뮬레이션을 통해 LFM-FSK 신호를 이용한 신호 처리 알고리즘이 BSD와 LCA와 같은 차량 안전 주행 시스템에 적용하기 적합함을 알 수

있다.

참 고 문 헌

- [1] 한석균, "차량 감지용 FMCW 레이더의 단일 평형 다이오드 주파수 혼합기 설계 및 제작", 한국전자과학회논문지, 14(12), pp. 1336-1341, 2003년 12월.
- [2] Tan-Hsiung Ho, Shyh-Jong Chung, "A compact 24 GHz radar sensor for vehicle sideway-looking applications", *European Radar Conference 2005, EURAD 2005*, 2005.
- [3] Zhang Dabiao, Kang Yueyi, and Liu Hongyun, "Design of automobile collision avoidance warning system based on LabVIEW", *8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments 2007, ICEMI'07*, 2007.
- [4] Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, 2001.
- [5] Hermann Rohling, Christof Möller, "Radar waveform for automotive radar systems and applications", *Radar Conference 2008 '08 IEEE*, pp. 1-4, May 2008.
- [6] Marc-Michael Meinecke, Hermann Rohling, "Combination of LFMCW and FSK modulation principles for automotive radar systems", *German Radar Symposium GRS2000*, Berlin, Oct. 2000.
- [7] Bi Xin, Du Jinsong, "A new wave for range-velocity decoupling in automotive radar", *2010 IEEE 2nd International Conference on Signal Processing Systems(ICSPS)*, 2010.
- [8] Hermann Rohling, Marc-Meinecke, "Waveform design principles for automotive radar systems", *Radar, CIE International Conference 2001 IEEE*, 2001.

최 각 규



2006년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 3월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 통합 박사과정
[주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호 처리, 자동 표적 인식, 시간-주파수 분석

김 효 태



1978년 2월: 서울대학교 전자전기공학과 (공학사)
1982년 2월: 서울대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1986년 2월: Ohio State Univ., Columbus, OH, USA Electronic Engineering (공학박사)
1986년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
[주 관심분야] RCS, EMI/EMC, 레이더 신호처리

한 승 구



2007년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 3월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 통합 박사과정
[주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호 처리, 자동 표적 인식, 시간-주파수 분석

김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수
2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
[주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호 처리, 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정