

통신에 의한 신호시스템의 안전성 확보에 관한 연구

백종현*, 왕종배, 변운섭, 박현준, 한영재, 김길동
한국철도기술연구원

The Study of Improved Safety of Signalling System using Communication

Baek, JongHyen
Park, HyunJun

Wang, JongBae
Han, YoungJae

Byun, YeunSub
Kim, KilDong

Abstract - The automotive environment presents to the FMCW radar sensor a multitude of moving and fixed targets and the sensor must detect and track only the targets which may pose a threat of collision or passengers accident. The sensor must function accurately in the presence of background echoes generated by moving and fixed targets, ground reflections, atmospheric noises, including rains, fog, and, snow and noise generated within the receiver.

False detection of the desired target in this environment may issue false alarms. That may be dangerous to the passenger and the vehicle. A high false alarm rate is totally unacceptable. The false alarm mechanism consists of noise peaks, crossing the threshold and the undesired response of the system to off lane targets which are not potentially hazardous to the radar equipped vehicle.

This paper presents an improve technique safety performance for driver-less operation using FMCW radar sensors.

1. 서 론

현재 국내 철도 신호시스템은 궤도회로를 이용한 고정 폐색방식을 사용하고 있으며 최근에 개통된 도시철도 노선의 경우에는 ATC/ATO 시스템의 채용과 함께 무인 운전이 가능한 단계이다. 그러나 앞으로의 신호시스템은 운전시각의 단축을 통한 운영효율 및 승객의 편리성을 향상시키기 위하여 이동폐색방식의 신호시스템이 적용될 것이며, 이러한 시스템은 선행열차 또는 지상시스템과의 지속적인 RF 통신하에 선행열차의 속도와 선행열차와의 거리 등의 정보를 수신하여 자기열차의 속도를 제어하는 등의 방법을 사용할 것이다. 그러나 통신의 신뢰성이 EMI/EMC 또는 기타 다른 요인에 의하여 저하되는 등의 상황에서는 무인운전의 경우 치명적인 사고를 유발시킬 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 부가적인 안전성 확보시스템이 필요할 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 선행열차와의 거리 및 상대속도를 추출하여 충돌의 위험을 제거할 수 있는 시스템을 제안하였으며, 다양한 센서 중에서 광학센서를 이용한 시스템에 비해 날씨나 기후 등의 외부환경에 대해 영향을 거의 받지 않는다는 장점을 가지고 있는 77GHz FMCW 레이더를 이용하였다. 이러한 시스템의 상용화를 위해서는 무엇보다도 실제 운행환경에서의 시스템 성능에 대한 안정된 신뢰도가 요구된다. 즉, P_{fa} (False Alarm Rate)가 절대적으로 작아야 하며 P_D (Detection Probability)는 커야 함을 의미한다. P_{fa} 와 P_D 는 탐지 알고리즘에 의해 결정된다고 볼 수 있으나 단순히 탐지 알고리즘에 의해서는 안

정된 시스템 성능 획득이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 표적 추출 알고리즘 및 정지물체소거 알고리즘과 CFAR(Constant False Alarm Rate) 알고리즘을 개발하였다.

2. 본 론

본 연구에서 제안하고 있는 시스템의 기본 기능은 선행열차에 대한 거리 및 속도정보 추출에 있다. 그러나 실제 운행환경에서는 정지해 있는 물체로부터 반사되어 오는 신호도 표적으로 나타날 수 있다. 그러므로 시스템의 성능을 높이기 위해 이와 같은 정지표적을 제거하는 알고리즘이 요구된다. 그림 1은 이와 같은 성능을 획득하기 위해 요구되는 레이더 시스템의 신호처리부 알고리즘을 나타내고 있으며 선행열차의 거리 및 속도 추출 알고리즘, 정지물체 소거 알고리즘 등을 포함하고 있다.

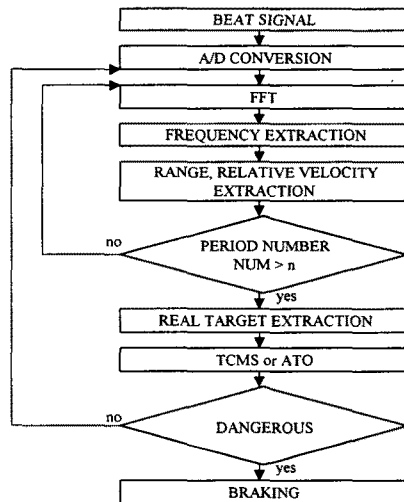


그림 1. 신호처리 알고리즘

FMCW 레이더의 경우 거리 및 속도 추출 특성은 이용하는 레이더 파형의 특성에 의해 결정되며 본 연구에서 사용하고 있는 레이더 파형은 그림 2와 같으며 각각의 성분은 다음과 같다.

- $0 \sim T_1$: Chirp-up frequency ($f_{up} = f_d - dF$)
- $T_1 \sim T_2$: Chirp-down frequency ($f_{dw} = f_d + dF$)
- $T_2 \sim T_3$: Doppler frequency ($f_{dp} = f_d$)

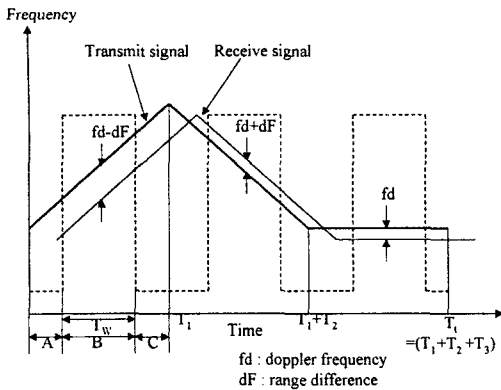


그림 2. FMCW 레이다를 이용한 선행열차 탐지

FMCW 레이다 센서로부터 신호처리부로 입력되는 신호들은 f_{up} , f_{dw} , f_{dp} 등이며 이러한 세 신호의 조합에 의해 속도의 차이에 의한 주파수 f_d 와 거리에 의한 주파수 dF 를 얻을 수 있게 된다.

선행열차의 거리와 속도 검출 알고리즘은 측정된 거리와 속도의 분해능과 측정 데이터의 정확도가 중요한 요소로 작용하게 된다. 측정속도의 분해능은 식 (1)의 주파수 분해능에 근거하여 식 (4)에 의해 결정되고 측정거리의 분해능은 식 (3)에 의해 결정된다[1] [2] [3] [4].

$$\Delta F = \frac{f_s}{N} \quad \text{----- (1)}$$

$$T_w = \frac{1}{\Delta F} \quad \text{----- (2)}$$

$$\Delta R = \frac{c \cdot T_w \cdot \Delta F}{2 \cdot BW} \quad \text{----- (3)}$$

$$\Delta V_r = \frac{c \cdot \Delta F}{2 \cdot f_c} \quad \text{----- (4)}$$

여기에서, ΔF : 주파수분해능, ΔR : 거리분해능
 ΔV_r : 속도분해능, T_w : 관측시간
 f_s : 샘플링 주파수, N : FFT points
 BW : 주파수대역폭, f_c : 중심주파수
 c : 광속(3×10^8 m/s),

위 식 (3)에서 알 수 있듯이 선행열차와의 거리를 위한 거리 분해능 ΔR 은 주파수 분해능 ΔF 에 관계없이 주파수 대역폭에 의해 결정되며, 이와는 다르게 선행열차의 속도를 위한 식 (4)의 속도 분해능은 주파수 대역폭에 관계없이 주파수 분해능에 의해서 결정된다. 즉 샘플링 주파수에 비례하고 FFT points에 반비례한다.

따라서 선행열차와의 거리 R 과 상대속도 V_r 은 식 (5)와 (6)에 의해서 결정된다[3] [4].

$$R = \frac{c \cdot T_w \cdot dF}{2 \cdot BW} \quad \text{----- (5)}$$

$$V_r = \frac{c \cdot f_d}{2 \cdot f_c} \quad \text{----- (6)}$$

여기에서, dF : 거리 차이에 의한 주파수
 f_d : 속도에 의한 도플러 주파수

위의 수식들에 의해서 선행열차의 거리와 속도 정보를 추출할 수 있으나 실제 열차가 운행되는 환경은 일정하지 않다. 따라서 안정된 탐지 특성을 획득하기 위해서는 적응 탐지 알고리즘이 요구된다. 그러나 탐지 알고리즘만을 이용해서는 실제 시스템에서 요구하는 탐지 특성을 얻기 어렵기 때문에 추적 알고리즘 등과 같은 탐지 성능을 개선하기 위한 추가적인 방법이 요구된다. 본 연구에서는 CFAR 알고리즘을 이용하였다. 또한 탐지 성능을 향상시키기 위해 선행열차 이외의 탐지되는 정지 물체를 소거해야 하며 이는 자기열차의 속도를 이용하여 정지 물체의 상대속도를 계산하고 이에 해당하는 표적을 제거 하므로서 정지표적을 소거할 수 있다.

그림 2에서 나타난 것과 같이 $0 \sim T_1$ 까지의 시간을 A, B, C의 세 부분으로 구분하였을 때 A와 B 부분에서는 실제 탐지하고자 하는 선행열차의 정보가 아닌 상이한 신호가 얻어질 수 있다. 이러한 현상을 막기 위해 B 부분, 즉 관측시간 T_w 동안의 신호만을 획득하여 신호처리 과정을 수행토록 하였다.

3. 신호처리장치 구현 및 시뮬레이션

본 연구에서 제안하고 개발한 알고리즘의 검증을 위해 표 1에서 제시한 파라미터들을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1. 파라미터 설정

Bandwidth (BW)	150MHz	Center Frequency (f_c)	77GHz
Total Period (T_i)	30ms	Sampling Frequency (f_s)	250kHz
Single Sweep Time ($T_1 = T_2 = T_3$)	10ms	FFT	2048
Range Resolution (ΔR)	1m	Maximum Range (R_{max})	500m
Velocity Resolution (ΔV_r)	1.71km/h	Maximum Velocity (V_{max})	200km/h

FMCW 레이다를 이용한 시스템에서 선행열차의 거리 및 속도 정보를 탐지하기 위해 위의 표 1과 같은 파라미터 값들을 설정하였다. 이러한 파라미터 값들은 레이다 센서의 구성과 관련된 파라미터(Transmitting power, Center frequency, Bandwidth, Sweep time)와 신호처리와 관련된 파라미터(Sampling frequency, FFT points, Maximum range, Range Resolution, Maximum velocity, Velocity resolution) 등이 있다. 이러한 파라미터 값들은 앞의 식 (1) ~ (6)에서 알 수 있듯이 상호간에 연관되며 또한 대입된다. 따라서 파라미터 값을 설정할 때 우선적으로 고려하여야 할 것이 충분한 측정거리와 속도의 확보이며, 또한 실시간 처리를 처리하여야 할 정보량의 조절이다. 이러한 것들을 고려하여 파라미터 값들을 위의 표 1과 같이 설정하였다.

신호처리부에서 개발한 선행열차의 거리 및 속도 추출 알고리즘, 정지물체 소거 알고리즘들을 검증하기 위해 가상 이동 표적의 레이다 신호 데이터를 Matlab을 이

용하여 만든 후에 I/O Board를 통해 내보낸다. 이러한 신호 데이터를 Data Acquisition Board를 이용하여 PC 상에서 시뮬레이션을 수행 한 후 가상의 데이터에서 설정된 이동표적 또는 정지물체에 대한 속도 및 거리의 정확성과 missing과 ghost target의 발생여부를 가지고 평가하였다. 여기에서 missing이란 실제 이동표적이 있음에도 탐지하지 못함을 의미하여, ghost target이란 이동표적이 없음에도 가상의 정지물체에 의해 이동표적이 있는 것처럼 나타나는 것을 의미한다.

이러한 시뮬레이션을 위하여 자기열차의 속도는 80km/h라고 가정하고 10s의 시간동안 한 주기를 100ms로 하여 총 100주기에 대한 가상의 이동표적 하나나 둘 또는 정지물체와 조합한 데이터를 만들어 시뮬레이션을 수행하며 그러한 각각의 데이터는 다음과 같다.

Data 1 : 가상의 이동표적만 하나

- (1) 이동표적 : 초기속도 90km/h, 초기거리 100m에서 10s 후에 100km/h로 증가

Data 2 : 가상의 이동표적만 둘

- (1) 이동표적 1 : 초기속도 90km/h, 초기거리 100m에서 10s 후에 100km/h로 증가
- (2) 이동표적 2 : 초기속도 100km/h, 초기거리 400m에서 10s 후에 60km/h로 감소

Data 3 : 가상의 이동표적 하나, 정지물체 하나

- (1) 이동표적 : 초기속도 90km/h, 초기거리 100m에서 10s 후에 100km/h로 증가
- (2) 정지물체 : 매 0.5s 마다 100m 거리에 발생시킴

Data 4 : 가상의 이동표적 하나, 정지물체 둘

- (1) 이동표적 : 초기속도 100km/h, 초기거리 400m에서 10s 후에 60km/h로 증가
- (2) 정지물체 : 매 0.5s 마다 100m 거리에 발생시킴
- (3) 정지물체 : 매 1s 마다 200m 거리에 발생시킴

Data 5 : 가상의 이동표적 둘, 정지물체 하나

- (1) 이동표적 1 : 초기속도 90km/h, 초기거리 100m에서 10s 후에 100km/h로 증가
- (2) 이동표적 2 : 초기속도 100km/h, 초기거리 400m에서 10s 후에 60km/h로 감소
- (3) 정지물체 : 매 0.5s 마다 100m 거리에 발생시킴

Data 6 : 가상의 이동표적 둘, 정지물체 둘

- (1) 이동표적 1 : 초기속도 90km/h, 초기거리 100m에서 10s 후에 100km/h로 증가
- (2) 이동표적 2 : 초기속도 100km/h, 초기거리 400m에서 10s 후에 60km/h로 감소
- (3) 정지물체 : 매 0.5s 마다 100m 거리에 발생시킴
- (4) 정지물체 : 매 1s 마다 200m 거리에 발생시킴

위의 Data 1 ~ 6까지의 시뮬레이션 결과로서 평균 거리 및 속도의 오차와 함께 missing이나 ghost target의 발생 수를 표 2에서 보여주고 있다.

표 2에서 나타내 주듯이 전체적으로 시뮬레이션 결과에서 평균거리 및 속도의 오차는 표 1에서 제시한 파라미터중 거리 및 속도의 분해능보다 훨씬 작음을 알 수 있었다. 또한 가상의 이동표적 하나만 존재하는 Data 1의 결과에서 missing이나 ghost target은 발생하지 않았으며 Data 3 또는 Data 4와 비교하였을 때 평균거리 및 속도의 오차가 거의 유사하여 본 연구에서 개발한

탐지 알고리즘 및 정지물체 소거 알고리즘이 만족스러운 수준임을 알 수 있었다. Data 2, Data 5, Data 6의 경우에는 두 개의 가상 이동표적이 존재하며 이것들의 주파수 간섭에 의해 Data 2의 경우에는 missing이 두 번, ghost target이 세 번 발생하였다. 또한 Data 5와 Data 6의 경우에는 정지물체마저 두 개의 가상 이동표적에 영향을 미쳐 Data 2의 경우보다 missing이나 ghost target의 발생이 증가함을 알 수 있었다.

표 2. 시뮬레이션 결과

	평균거리 오차 (m)	평균속도 오차 (km/h)	missing	ghost target
Data 1	0.331	0.492	0	0
Data 2	0.367	0.521	2	3
Data 3	0.332	0.492	0	0
Data 4	0.331	0.491	0	0
Data 5	0.369	0.524	3	5
Data 6	0.368	0.523	3	5

3. 결 론

본 연구에서는 점차 증대될 것으로 예상되는 RF 통신에 의한 이동폐색방식의 신호시스템과 무인운전시 열차 운행의 안전성을 향상시키기 위하여 FMCW 레이다 센서를 이용하여 선형열차의 거리 및 속도 정보를 지속적으로 탐지하므로써 RF 통신의 신뢰성이 저하되었을 때 등의 비상시 선형열차와의 충돌이나 위험상황을 회피할 수 있는 시스템을 제안하였으며, 이러한 시스템에서 요구되는 선형열차의 거리 및 속도 추출 알고리즘, 정지물체 소거 알고리즘 등을 개발하였다. 개발된 알고리즘에 대해 시뮬레이션을 수행하여 평가한 결과 거리 및 속도의 오차는 만족할 만한 수준이었으나 부분적으로 탐지하지 못하거나 ghost target이 발생하였다. 이러한 부분을 해결하기 위해서는 추적 알고리즘 등의 탐지 성능을 높이기 위한 알고리즘이나 노선의 운행환경에 대한 반사 신호를 DB화하여 실시간적으로 비교할 수 있는 알고리즘 등의 개발이 요구된다.

본 연구에서 제안한 시스템은 TCMS 또는 ATO 등과 연계하여 RF 통신에 의한 이동폐색방식의 신호시스템과 무인운전방식의 열차운행시 보다 안전한 열차운행을 구현할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Charles, M.Charbit, J. Prado, A. Servel, M. Attia, "Frequency modulated continuous wave radar signal processing to improve active safety features," in IMechE, 1994, pp.81-86.
- [2] H. Rohlng, E. lissel, "77GHz Radar Sensor for Car Application," in IEEE International Radar Conference, 1995, pp. 373-379.
- [3] M. I. Skolnik; Radar Handbook McGraw-Hill, Second Edition.
- [4] B. Edde; Radar Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1993.