

FM 라디오 기반 PCL 시스템 시뮬레이터 개발

방중현, 김호재, 권순영, 김형남[©]
부산대학교

hnkim@pusan.ac.kr

Development of a Simulator for FM Radio-based PCL System

Jong-Hyeon Bang, Ho Jae Kim, Soon-Young Kwon, Hyoung-Nam Kim
Pusan National Univ.

요약

FM 라디오 기반 PCL 시스템은 방송 목적으로 활용되는 FM 라디오 신호를 사용하여 표적의 위치와 속도에 대한 정보를 추정하는 수동형 레이더이다. 본 논문에서는 송신기 및 표적 위치와 속도에 따른 환경에서 PCL 시스템을 사용자가 쉽게 사용하여 결과를 도출하고 성능 분석을 용이하도록 하기 위해 PCL 시스템 시뮬레이터를 개발한 결과를 제시한다. 개발된 시뮬레이터는 표적과 송신기 위치에 따른 여러 상황을 가정할 수 있고, 각 송신기별로 FM 신호를 생성할 수 있으며, 생성된 FM 신호를 기반으로 기준 신호, 표적 반사 신호를 모델링하여 수신되도록 한다. 간섭 신호 제거를 위해 ECA를 사용하며, 교차모호함수를 통해 바이스태틱 정보를 획득한 후 위치 추정 알고리즘을 통해 표적의 위치를 추정한다. 또한 칼만 필터를 이용한 추적 알고리즘을 통해 표적을 추적하고 이에 대한 성능 결과를 분석할 수 있다.

I. 서론

FM(frequency modulation) 라디오 기반 PCL(passive coherent location) 시스템은 국내 상용 통신 신호 중 FM 스테레오 신호를 이용하는 바이스태틱 레이더 시스템이다. 송신기로부터 직선 경로로 수신되는 직접 경로 신호와 표적에 반사되어 수신되는 표적 반사 신호 간의 시간 차이와 도플러 주파수 차이를 이용해 표적의 위치와 속도를 추정한다.^[1]

본 논문에서는 사용자가 PCL 시스템의 성능 분석 및 결과를 용이하게 확인할 수 있도록 앱 디자이너 기반의 PCL 시뮬레이터 개발 결과를 제시한다. 시뮬레이터는 그림 1의 각 탭 별로 블록을 구성하였으며, 각 탭에서 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있다.

II. PCL 시스템 시뮬레이터 구성

본 논문에서 개발한 PCL 시스템 시뮬레이터는 그림 1과 같이 수신 환경 설정, 수신 신호 생성, 정보 신호 처리의 3가지 과정으로 구성된다.

먼저 수신 환경 설정 단계에서 표적의 위치 및 속도와 3개의 송신기 위치를 설정한다. 송신기는 $[0 \ 0 \ 0]^T$ 위치에 고정되어 있으며 신호 관측시간을 입력한 후 실행 버튼을 누르면 설정한 수신 환경이 도시된다. 그림 2는 각 송신기의 위치를 $[-50 \ 10 \ 0.1]^T$, $[-10 \ -60 \ 0.15]^T$, $[20 \ 45 \ 0]^T$ km로 설정하였을 때의 결과이다.

다음으로 FM 신호 생성 단계에서 FM 스테레오 신호를 생성한다. FM 변조 신호는 식(1)과 같다.

$$s(t) = \exp\left\{j2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau\right\}. \quad (1)$$

여기서 k_f 는 75kHz의 최대 주파수 천이를 나타내며 식 내부에 있는 메시지 신호는 다음과 같다.

$$m(t) = 0.9\left[\frac{L+R}{2} + \frac{L-R}{2}\sin(4\pi f_p t)\right] + 0.1\sin(2\pi f_p t). \quad (2)$$

이 때 L, R 은 각각 왼쪽, 오른쪽 채널 신호이며 f_p 는 19kHz의 파일렛 주파수를 나타낸다. 시뮬레이터에서 3개의 음원 파일을 사용하여 3개의 메시지 신호를 생성하고 생성된 메시지 신호들은 각각 송신기에서 송신하는 FM 신호로 변조된다. 또한 송신기마다 다른 반송파 주파수를 설정하여 세 신호가 상용 FM 신호 대역인 88~108MHz에서 생성되고 있는지 확인할 수 있도록 하였다. 그림 3은 FM 신호 생성 결과창을 나타낸 것이고 각 송신기마다 99.9MHz, 91.7MHz, 95.9MHz의 반송파 주파수를 할당하였다.

이후 단계는 수신 신호의 SNR(signal-to-noise ratio) 계산 단계로, 각 송신기에서 수신기로 수신되는 직접 경로 신호와 표적 반사 신호의 SNR을 계산한다. SNR은 바이스태틱 레이더 방정식을 통해 구할 수 있으며 다음과 같다.

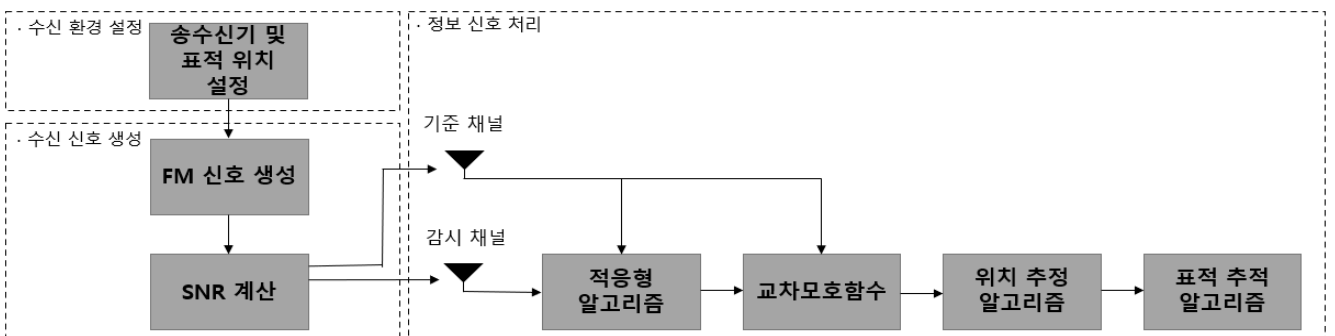


그림 1. PCL 시스템 시뮬레이터 흐름도

표 1. 바이스테틱 레이더 방정식 파라미터

Symbol	Meaning	Symbol	Meaning
P_t	송신 신호 파워	k	볼츠만 상수
G_t	송신 안테나 이득	T_0	잡음 기준 온도
G_r	수신 안테나 이득	B	수신기 유효 대역폭
σ_b	유효 반사 면적	F	수신기 유효 잡음 지수
λ	신호 파장	r_1	송신기-표적 거리
L	시스템 손실	r_2	표적-수신기 거리
d	송신기-수신기 거리	-	-

$$SNR_{ehco} = \frac{P_r}{P_n} = \frac{P_t G_t}{(4\pi)^3 r_1^2 r_2^2} \times \frac{\sigma_b G_r \lambda^2 L}{k T_0 B F}, \quad (3)$$

$$SNR_{direct} = \frac{P_r}{P_n} = \frac{P_t G_t}{(4\pi)^3 d^2} \times \frac{G_r \lambda^2 L}{k T_0 B F}. \quad (4)$$

여기서 사용된 파라미터들은 표 1에 정리하였다. 계산된 SNR을 통해 수신 신호의 모델링이 가능하며, 클러터가 없는 단일 표적신호를 가정할 경우 기준 채널에 수신되는 신호와 감시채널에 수신되는 신호는 다음과 같다.^[2]

$$s_{ref}(t) = A_{ref} s(t - \tau_d) + n_{ref}(t), \quad (5)$$

$$s_{surv}(t) = A_{surv} s(t - \tau_d) + A_{Tg} s(t - \tau_{Tg}) e^{j2\pi f t} + n_{surv}(t), \quad 0 \leq t < T. \quad (6)$$

여기서 A_{ref} , A_{surv} , A_{Tg} 는 기준 채널에서 직접 경로 신호의 크기, 감시 채널에서 직접 경로 신호의 크기, 표적 반사 신호의 크기이다. 또한 τ_d , τ_{Tg} , f_d , n_{ref} , n_{surv} 는 직접 경로 신호의 시간지연, 표적 반사 신호의 시간지연, 도플러 주파수, 기준 채널과 감시 채널에서의 열 잡음을 나타내며 T 는 신호 수집 시간이다.

SNR을 계산한 후 표적 반사 신호에서 불필요한 간섭 신호를 ECA(extensive cancellation algorithm)를 통해 제거가 가능하다. ECA는 최소제곱법을 이용하여 구현할 수 있으며 다음과 같다.^[1]

$$\min_{\alpha} \{\|s_{surv} - \mathbf{X}\alpha\|^2\}. \quad (7)$$

위 수식을 최소화하는 가중치 벡터 α 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 \mathbf{X} 는 시간 지연된 기준 채널 신호를 열 벡터로 가지는 행렬이고, α 는 감시 채널의 간섭 신호를 제거하기 위한 벡터이며 s_{surv} 는 감시채널에 수신된 표적 반사 신호이다.

$$\alpha = (\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H s_{surv}. \quad (8)$$

최종적으로 ECA를 통과한 감시 채널의 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_{ECA} = s_{surv} - \mathbf{X}\alpha = [\mathbf{I}_N - \mathbf{X}(\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H] s_{surv} = \mathbf{P} s_{surv}. \quad (9)$$

교차모호함수는 기준 채널 신호와 ECA를 통과한 감시 채널 신호의 시간 지연 τ 와 도플러 주파수 천이 f 에 대한 상호 상관함수를 통해 구현할 수 있으며 다음과 같다.^[3]

$$A(\tau, f) = \frac{1}{T} \int_0^T s_{surv}(t) s_{ref}(t - \tau) e^{-j2\pi f t} dt. \quad (10)$$

그림 4는 시뮬레이터에서 ECA와 교차모호함수의 결과창을 나타낸 것이며 단일 표적으로 가정하였기 때문에 각각의 교차모호함수에서 첨점을 확인할 수 있다.

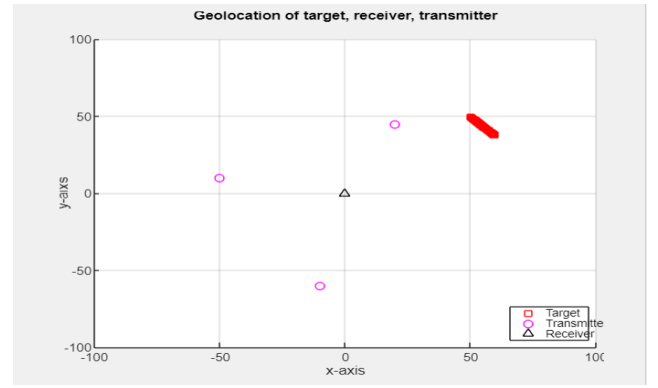


그림 2. 수신 환경 설정 결과창

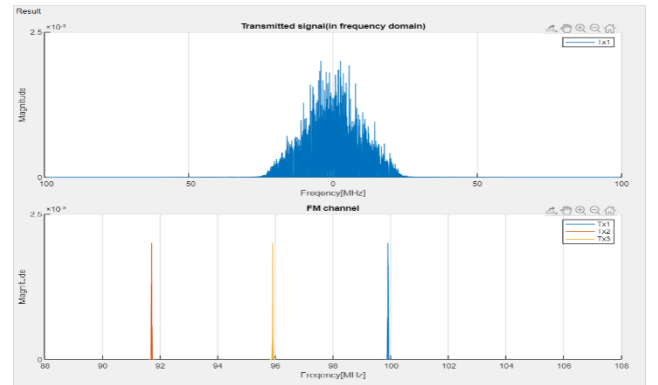


그림 3. FM 신호 생성 결과창

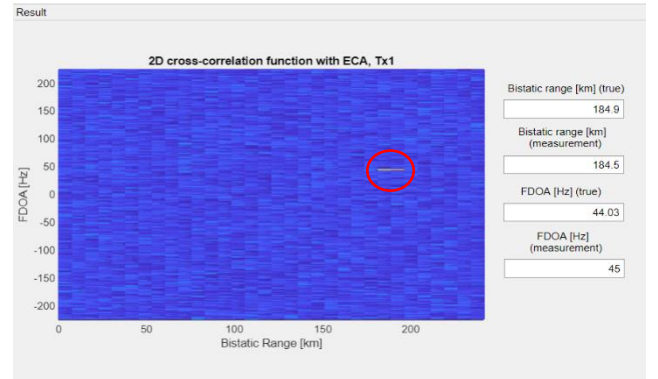


그림 4. ECA와 교차모호함수 결과창

각 첨점으로부터 표적의 정보를 획득할 수 있으며 획득한 정보는 참값과 측정값을 모두 나타내어 서로 비교할 수 있도록 하였다. 그림의 결과에서 참값과 측정값 사이에 오차가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 이는 TDOA, FDOA 측 간격에 의한 해상도 차이에서 기인한 것으로 분석된다.

마지막으로 위치 추정 및 추적 단계에서 각각의 송신기에서 획득한 바이스테틱 거리와 속도 정보들을 통해 표적의 위치와 속도를 추정 및 추적한다. 표적의 위치와 속도는 3개 이상의 송신기 쌍으로부터 얻을 수 있는 바이스테틱 거리와 속도로부터 추정할 수 있으며 추정 방법은 다음과 같다.^[4]

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \arg \min_{\hat{\mathbf{x}}_t} \|\mathbf{r} - \mathbf{r}(\hat{\mathbf{x}}_t)\|, \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{v}}_t = \arg \min_{\hat{\mathbf{v}}_t} \|\mathbf{V} - \mathbf{V}(\hat{\mathbf{v}}_t)\|. \quad (11)$$

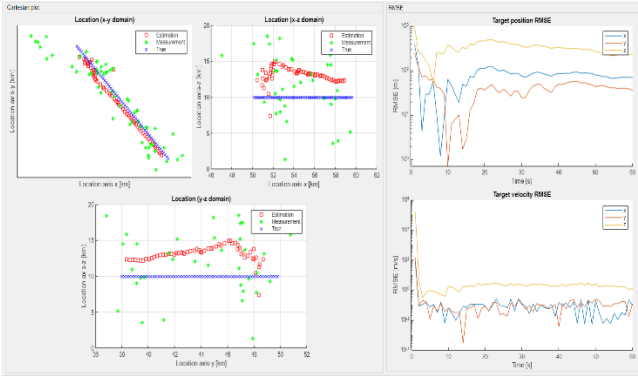


그림 5. 위치 추정 및 추적 결과창

이 때 \mathbf{r} 은 실제 바이스테틱 거리 벡터를, $\mathbf{r}(\hat{\mathbf{x}}_t)$ 는 추정된 표적의 위치 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 에 대한 바이스테틱 거리 벡터를 나타내며, \mathbf{V} 는 실제 바이스테틱 속도 벡터를, $\mathbf{V}(\hat{\mathbf{v}}_t)$ 는 추정된 표적의 속도 $\hat{\mathbf{v}}_t$ 에 대한 바이스테틱 속도 벡터를 나타낸다.

위치 추적은 칼만필터를 이용해 구현할 수 있으며 칼만 이득 $\mathbf{K}(k+1)$, 예측 상태 $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$, 예측 공분산 $\mathbf{P}(k+1|k)$ 그리고 측정값 $\mathbf{z}(k+1)$ 을 이용해 다음 상태 $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$ 와 다음 공분산 $\mathbf{P}(k+1|k+1)$ 을 추정한다. 칼만 필터의 수식은 다음과 같다.^[5]

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}(k|k), \quad (12)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{F}\mathbf{P}(k|k)\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}, \quad (13)$$

$$\mathbf{V}(k+1) = \mathbf{z}(k+1) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}(k+1|k), \quad (14)$$

$$\mathbf{S}(k+1) = \mathbf{H}\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}, \quad (15)$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T\mathbf{S}(k+1)^{-1}, \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)\mathbf{V}(k+1), \quad (17)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k+1) = \{\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{H}\}\mathbf{P}(k+1|k). \quad (18)$$

여기서 \mathbf{F} 는 상태 행렬, \mathbf{H} 는 출력 행렬, \mathbf{Q} 는 시스템 잡음 공분산 행렬, \mathbf{R} 은 측정 잡음 공분산 행렬을 의미한다. 표적은 등속 운동을 한다고 가정했으므로 다음과 같은 행렬 모델을 사용한다.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\mathbf{Q} = q \begin{bmatrix} T^3 & T^2 \\ 3 & 2 \\ T^2 & T \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_R^2 & 0 \\ 0 & \sigma_V^2 \end{bmatrix}.$$

그림 5는 시뮬레이터에서 위치 추정 및 추적의 결과창을 나타낸 것이며 결과창의 왼편에서 추정 및 추적 결과를 오른편에서 위치와 속도에 대한 RMSE(root mean square error)를 확인할 수 있도록 하였다. 그 결과 x 축과 y 축은 z 축에 비해 비교적 위치 추정 오차가 작으며, 위치와 속도에 대한 RMSE는 일정 시간 이상을 추적했을 때 초기값보다 낮은 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 표적의 위치를 추정 및 추적하고 성능을 분석할 수 있는 PCL 시스템 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터를 통해 직접 경로 신호와 표적 반사 신호가 수신되는 환경을 모의할 수 있으며, ECA를 통해 간섭 신호를 제거하고 교차모호함수를 통해 단일 표적의 바이스테틱 정보를 얻을 수 있다. 이를 바탕으로 표적의 위치를 추정 및 추적할 수 있으며 이에 대한 성능을 분석할 수 있다. 향후 연구에서는 실제 환경과 유사하게 하기 위해 다중표적, 클러터가 존재하는 환경을 고려하고 이에 따라 요구되는 CFAR 탐지를 추가할 계획이다.

참고 문헌

- [1] F. Colone, D. W. O' Hagan, P. Lombardo, C. J. Baker, "A Multistage Processing Algorithm for Disturbance Removal and Target Detection in Passive Radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 2, pp. 698-722, Apr. 2009.
- [2] 김호재, 김동규, 박근호, 박진오, 고재현, 김형남, "FM 스테레오 신호 기반 PCL 시스템의 수신 신호 모델링," *2016년도 한국통신학회 하계종합학술대회논문집*, 제주, 2016년 6월, pp.370~372
- [3] 박근호, 손소영, 김형남, "FM 방송 기반 수동형 레이더 구현 및 표적 탐지 결과 분석," *한국통신학회논문지*, vol. 44, no. 6, pp. 1201-1209, 2019년 6월.
- [4] Mateusz Malanowski, Krzysztof Kulpa, "Two Methods for Target Localization in Multistatic Passive Radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 1, pp. 572-580, Jan. 2012.
- [5] Ho Jae Kim, Geun-Ho Park, Dong-Gyu Kim, and Hyoung-Nam Kim, "Analysis of bistatic range and velocity tracking performance according to dynamic models in passive bistatic radar," in *Proc. International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, Brisbane, Australia, Feb. 2018, pp. 145-149.