

## 멀티스태틱 PCL 개발을 위한 산란신호 모의

### Scattering Signal Model to Develop Multi-Static Passive Coherent Location Apparatus

조치현 · 심홍석\* · 임상훈\* · 박준식\* · 곽현규\*\* · 이종환\*\*

Chihyun Cho · Hong-Suk Shim\* · Sang Hun Im\* · Jun-Sik Park\* · Hyun-Gyu Kwak\*\* · Jong-Hwan Lee\*\*

#### 요 약

본 논문에서는 FM 라디오신호를 이용하는 멀티스태틱 PCL 장비 개발을 위한 산란신호 모의방법에 대해 제안하였다. 제안된 방법은 규약에 따라 음성신호로부터 FM 방송 IQ를 생성하고, 송신소와 수신기 사이의 지형을 고려한 클러터 반사신호를 모의한다. 표적반사신호는 표적의 RCS와 운행 시나리오에 따른 시변 도플러 주파수를 고려하여 모의한다. 이때 연산시간을 최소화하기 위해 시간영역에서 IQ데이터의 샘플링 시간을 지연시키는 방법을 적용하였다. 또한 측정된 안테나 어레이 매니폴드를 적용하여 배열 안테나를 통해 수신하는 IQ신호를 모의하였다. 이후 ARD 지도에서 표적의 도플러 주파수와 거리 산출을 통해 생성된 IQ신호를 검증하였다.

#### Abstract

In this paper, we proposed a scattering signal model to develop a multi-static passive coherent location(PCL) apparatus using frequency modulation(FM) radio broadcasting. The proposed method first generates in-phase and quadrature(IQ) signals and FM broadcast signals, according to the protocol, and simulates the clutter signal considering the terrain between the transmitter and the receiver. The reflection signal from the target is simulated by considering the time-varying Doppler frequency and radar cross section. The sampling timing of the IQ data is delayed in the time domain to minimize the Doppler effect's computation time. The measured antenna manifold is applied to simulate the received IQ signal through the array antenna. Finally, the generated IQ signal is verified by extracting the Doppler frequency and information regarding the target's distance in the ambiguity range Doppler map.

Key words: Passive Radar, FM Broadcasting, Clutter, Doppler

#### I. 서 론

최근 스텔스 기능을 보유한 저피탐 항공기가 지속적으로 개발됨에 따라 종래의 레이더 시스템으로는 이러한 항공기에 대한 추적이 어려운 실정이다. 이에 대한 대안

으로 저주파 대역 방송신호를 이용한 수동형 레이더에 관한 연구가 활발히 진행되었다<sup>[1]~[7]</sup>. 저주파 대역에서는 특정 주파수 대역에 적합하도록 설계된 전파흡수도료(radar absorbing material: RAM)나 저피탐 형상 기술(RAS) 등이 효과적이지 못하다고 알려져 있다. 또한 동시에 다수의

「이 연구는 국방과학연구소의 재원 및 한화시스템(주)의 지원으로 연구되었음.」

한국표준과학연구원 전자기표준센터(Center for Electromagnetic Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

\*한화시스템 전자전연구센터(EW R&D Center, Hanwha Systems)

\*\*국방과학연구소 2본부(The 2nd R&D Institute, Agency for Defense Development)

· Manuscript received November 7, 2019 ; Revised December 10, 2019 ; Accepted December 12, 2019. (ID No. 20191107-001S)

· Corresponding Author: Chihyun Cho (e-mail: [chihyun.cho@kriss.re.kr](mailto:chihyun.cho@kriss.re.kr))

방송신호를 기반으로 멀티스태틱(multistatic) 레이더를 구현할 수 있으므로 모노스태틱(monostatic) 레이더에 비해 표적의 위치를 보다 정밀히 추적할 수 있다. 이와 더불어 저주파 레이더 시스템은 생산비용을 크게 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 국내의 여러 무선 방송서비스 중 FM 라디오 방송은 오랜 기간동안 서비스가 되어 넓은 커버리지와 다수의 송출 방송국을 보유하고 있다. 따라서 본 논문에서는 FM 대역 방송신호 기반의 멀티스태틱 수동형 레이더, 즉 passive coherent location(PCL)의 개발을 위한 산란신호 모의 방법에 대해 제안하였다.

본 논문의 2장에서는 산란신호 모의 방법에 대해 살펴본 후, 3장에서는 이를 구현하는 방법에 대해 설명한다. 이후 4장에서는 구현된 산란신호를 검증하고, 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 산란신호 모의

멀티스태틱 PCL 장비를 통해 수신되는 FM 방송신호는 송신소로부터 최단거리 경로를 통해 PCL 수신기로 전달되는 기준신호, 주변 지형물들의 반사를 통해 수신되는 클러터 신호, 그리고 움직이는 표적에 반사되어 수신되는 표적반사신호로 구분할 수 있다.

### 2.1 FM 방송신호

국내의 FM 방송신호는 다음과 같이 변조된다<sup>[8]</sup>. 우선 FM 변조 대상이 되는 기저대역 신호는 스테레오포닉(stereophonic) 변조 과정을 거친다.

$$m(t) = C_1(L(t) + R(t)) + C_2 \cos(2\pi f_p t) + C_1 \cos(4\pi f_p t)(L(t) - R(t)) \quad (1)$$

이때 기저대역 신호는 인간이 들을 수 있는 가청 주파수 대역의 신호로 좌/우 채널에 따라  $L(t)$ 와  $R(t)$ 로 표현되며,  $C_1$ 과  $C_2$ 는 각각 0.45, 0.1의 상대적 크기를 가진다. 또한  $f_p$ 는 파일럿 톤의 주파수로 19 kHz이며, 복조시에 사용된다. 따라서 좌/우 합채널은 DC 부근으로, 좌/우 차채널은 파일럿 톤의 2배인 38 kHz로 AM 변조된다. 이후 스테레오포닉 변조된 신호  $m(t)$ 는 규약에 따라 아래와 같이 FM 변조가 진행된다.

$$x(t) = \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi f_\Delta \int_{t_0}^t m(\tau) d\tau\right) \quad (2)$$

$f_\Delta$ 는 변조주파수로 국내 FM 방송 규약에 따라 75 kHz가 된다. 이때 IQ 테이터는  $x(t)$ 에 반송파  $\exp(-j2\pi f_c t)$ 를 곱한 후 기저대역 신호만 추출하면 된다. 따라서 FM 변조된 IQ 신호는 다음과 같다.

$$x_{IQ} = \frac{1}{2} e^{j2\pi f_\Delta \int_{t_0}^t m(\tau) d\tau} \quad (3)$$

### 2.2 기준 신호

송신소에서 수신기로 직접 수신되는 신호는 기준신호로 활용된다. 따라서 기준신호는  $x_{IQ}$ 신호를 지연시킴으로써 쉽게 계산할 수 있다. 송신소와 수신기 사이의 거리를  $L_{ref}$ 라고 하면 지연시간  $\Delta t_{direct}$ 는  $c_0 L_{ref}$ 가 된다. 여기에서  $c_0$ 는 빛의 속도를 나타내며, 신호세기의 감쇠는 Friis 방정식에 따라 나타낼 수 있다<sup>[9]</sup>. 따라서 기준신호의 IQ  $y_{ref}$ 는 다음과 같다.

$$y_{ref} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi L_{ref})^2} x_{IQ}(t + \Delta t_{direct}) \quad (4)$$

여기에서  $P_t$ 는 FM 방송국의 송출전력,  $G_t$ ,  $G_r$ 은 각각 송/수신 안테나 이득, 그리고  $\lambda$ 는 파장이다.

### 2.3 클러터 신호

PCL 장비의 수신신호는 수신기로 직접 들어오는 신호 외에 주변의 산이나 건물 등 여러 장애물들로부터 반사되어 들어오는 신호도 존재한다. 이러한 신호들은 기준신호나 표적반사신호와 구분하기 위해 클러터 신호로 통칭한다. 클러터들의 레이더 반사 면적(radar cross section: RCS), 지연시간, 송신소와 클러터 사이의 거리, 클러터와 수신기 사이의 거리를 각각  $\sigma_{clutter}$ ,  $\Delta t_{clutter}$ ,  $L_t$ ,  $L_r$ 로 나타내면 레이더 방정식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[10]</sup>.

$$y_{clutter} = \sigma_{clutter} \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 L_t^2 L_r^2} x_{IQ}(t + \Delta t_{clutter}) \quad (5)$$

## 2.4 표적반사신호

그림 1과 같이 바이스테틱(bistatic) 레이더의 경우, 송신기와 수신기가 서로 떨어져 있으므로 표적의 이동속도  $v_r$ 를 수신기에서 관찰된 표적의 속도로 치환하여 도플러 주파수를 계산해야 한다. 하지만 이를 등가적으로 전파의 이동경로( $D_t + D_r$ )를 시간에 따른 변화량으로도 나타낼 수 있다<sup>[11]</sup>.

$$f_d = \frac{v_r}{\lambda} \left\{ \frac{r + b \cos \phi}{[b^2 + r^2 + h^2 + 2br \cos \phi]^{1/2}} + \frac{r - (D_b - b) \cos \phi}{[(D_b - b)^2 + r^2 + h^2 - 2(D_b - b)r \cos \phi]^{1/2}} \right\}$$

$$= \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{d}{dt} (D_t + D_r) \right] \quad (6)$$

이렇게 계산된 도플러 주파수는 레이더 방정식에 적용하여 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$y_{target} = \sigma_{target} \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 D_t^2 D_r^2} x_{IQ}(t) e^{j2\pi \left( \int_{t_0}^t f_d dt - \phi_{f_s}(t_0) \right)} \quad (7)$$

도플러 주파수는 시간에 따라 변하는 함수이기 때문에 이를 적분한 후 초기 반송파의 위상값  $\phi_{f_s}(t_0)$ 를 보상해야 정확한 도플러 효과를 반영할 수 있다. 만약 표적 이동거리가  $f_s/c_0$ 보다 클 경우, IQ 데이터  $x_{IQ}$ 를  $1/f_s$  만큼 천이시킨 후 도플러 주파수 적분항과 위상을 적절히 초기화해야 한다. 여기에서  $f_s$ 는 샘플링 주파수이다.

## III. 개발 지원장비 구현

그림 2는 멀티스테틱 PCL 개발지원장비의 블록다이어

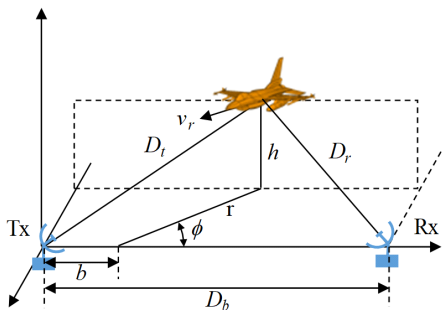


그림 1. 바이스테틱 레이더의 송/수신 경로  
Fig. 1. Transmit/receive path for a bistatic radar.

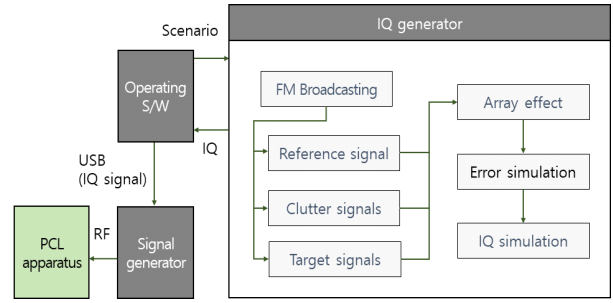


그림 2. PCL 개발지원장비 블록다이어그램

Fig. 2. Block diagram of PCL development support equipment.

그램을 나타낸다. 개발지원장비는 운용 S/W, IQ 생성기, 모의신호 발생기로 구성된다.

운용자는 송신소와 수신기 위치, 주변 클러터 환경 설정, 표적의 비행 시나리오 등을 결정하면, 운용 S/W는 이에 따라 제어 메시지를 생성한다. IQ 생성기는 제어 메시지에 따라 FM 라디오 모의신호를 생성한 후, 이를 바탕으로 송신소로부터 직접 수신하는 기준신호, 주변 클러터에 산란되어 수신하는 클러터신호, 그리고 시나리오에 따라 움직이는 표적에 반사된 표적반사신호를 생성한다. 이후 각 신호들은 입사방향에 따라 배열 안테나의 어레이 매니폴드가 곱해진 후 합쳐진다. 배열 안테나 수신특성이 합성된 신호는 모의신호 발생기 내 digital analog convertor (DAC)의 동적범위를 고려해 높은 레벨과 낮은 레벨신호로 분리되어 모의신호 발생기로 전달된다. 모의신호 발생기에서 생성된 다중채널 FM 대역 신호는 실시간으로 생성되어 향후 멀티스테틱 PCL 주장비 개발에 이용된다. 따라서 주어진 자원내에서 가능한 정확히 산란신호를 모의해야 한다.

## 3-1 클러터 환경 모의

본 연구에서는 ray-tracing 기반의 wireless insite 상용 프로그램<sup>[12]</sup>을 이용하여 송신소들과 수신기 사이의 신호지연, 감쇠량 및 수신방향을 계산하였다. 그림 3은 식장산 FM 송신소로부터 수신한 신호의 시뮬레이션 결과(실선)와 측정결과(파선)를 나타낸다. 측정은 실측한 IQ데이터를 자기자신과 교차상관(cross correlation)한 결과이며, 클러터 반사신호가 수신된 영역에서는 다른 곳보다 상관계

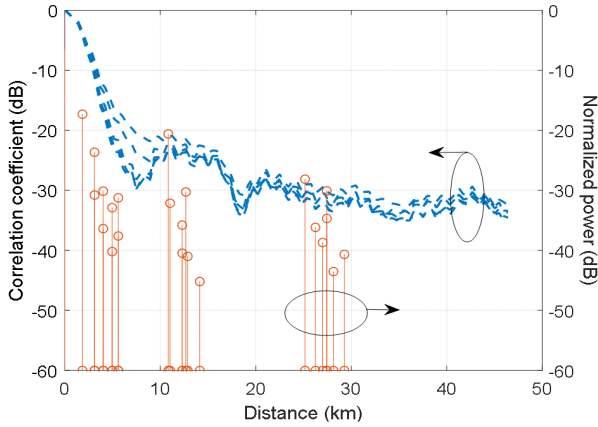


그림 3. Ray tracing 기법을 이용한 클러터신호 모의  
Fig. 3. Simulation of clutters using the ray tracing method.

수가 높게 계산된다. 측정은 총 5회 수행되었으며, 수신한 음성신호의 종류에 따라 다소 차이가 발생한다. 하지만 시뮬레이터를 통해 예측한 클러터 위치 및 반사신호 세기와 유사하게 상관계수가 측정된 것을 확인할 수 있다. 따라서 ray-tracing 기법을 이용한 클러터 분석이 FM 대역에서도 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하고, 이를 DB로 구축하여 활용하였다.

### 3-2 도플러 효과 구현

앞절에서 서술한 식 (6)과 식 (7)에 의해 계산되는 도플러 효과는 정확하지만, 많은 연산량을 필요로 한다. 따라서 실시간으로 IQ 데이터를 생성해야 하는 개발지원장비에서 사용하기에는 다소 부적합하다. 따라서 각 IQ샘플을 전파 도래시간  $\Delta t_{target}$ 만큼 지연을 시켜 도플러 효과를 다음과 같이 계산하였다.

$$\Delta t_{target} = \frac{D_t(t) + D_r(t)}{c_0} \quad (8)$$

이때 신호의 지연은 스테레오폰닉 변조부터 FM 변조까지 모든 과정에서  $\Delta t_{target}$ 만큼 지연이 되어야 한다. 우선 스테레오폰닉 변조는 음성신호의 좌/우 채널 신호를  $\Delta t_{target}$ 만큼 지연시킨다. 이때 음성신호 대역폭은 20 kHz 내외이지만 샘플링 대역폭은 그보다 수 배 이상 높으므로 FIR 필터를 기반으로 한 매트랩의 fractional delay 함수 등

을 이용하여 효과적으로 신호지연을 시킬 수 있다<sup>[13]</sup>. 이때 발생하는 오차가 식 (7)과의 주요한 차이가 된다. 그 외에는 삼각함수의 지연이 되므로 해석적으로 정확한 지연이 가능하다.

$$m_{target}(t) = C_1 [L(t + \Delta t_{target}) + R(t + \Delta t_{target})] + C_2 \cos(2\pi f_p(t + \Delta t_{target})) + C_3 \cos(4\pi f_p(t + \Delta t_{target})) [L(t + \Delta t_{target}) + R(t + \Delta t_{target})] \quad (9)$$

이후 스테레오폰닉 변조된 신호  $m_{target}(t)$ 는 FM 변조가 된다. 이때 반드시 반송파의 위상 지연  $\exp(-j2\pi f_c \Delta t_{target})$ 를 함께 계산해 주어야 한다.

$$x_{IQ-doppler}(t) = \frac{A}{2} e^{j2\pi f_\Delta \int_{t_0}^t m_{target}(\tau) d\tau} e^{-j2\pi f_c \Delta t_{target}} \quad (10)$$

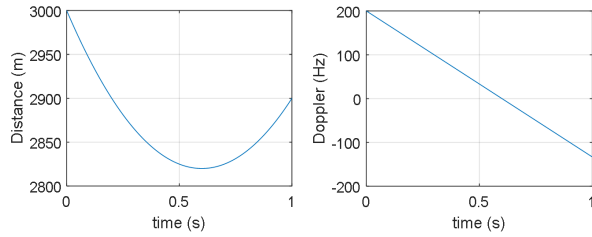
마지막으로 표적반사신호는 표적의 바이스태틱 RCS를 고려하여 다음과 같이 계산한다.

$$y_{target} = \sigma_{target} \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 D_t^2 D_r^2} x_{IQ-doppler}(t) \quad (11)$$

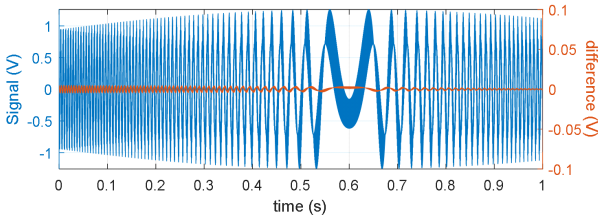
식 (7)과 (10)의 검증을 위해 시변 도플러 주파수 편이 현상을 삼각함수를 이용해 해석적으로 비교하였다. 사용된 삼각함수는 각각 100 MHz, 100 MHz+125 kHz, 100 MHz+250 kHz의 주파수 성분을 가지며, 진폭은 1, 0.5, 0.2이다. 이때 신호원과 표적 사이의 왕복거리와 이에 따른 도플러 주파수를 그림 4(a)와 그림 4(b)에 각각 도시하였다. 시간에 따른 왕복거리가 포물선의 형태를 가지므로 이에 대한 미분인 도플러 주파수는 선형특성을 갖는다. 각각 왕복거리로부터 계산된 지연시간을 바탕으로 계산된 신호와 도플러 주파수를 곱하여 계산된 신호의 차이를 그림 4(c)에 도시하였다. 각 신호들의 차이가 수치해석 오차인 0.4 % 이하로 서로 잘 일치하는 것을 확인하였다.

### 3-3 Bistatic RCS 분석

표적의 RCS 분석에는 WIPL-D 상용 EM해석 툴을 이용하였다<sup>[14]</sup>. WIPL-D는 고차항 기저함수 (high order basis function)을 기반으로 유전체 등이 포함된 해석을 비교적 빠른시간에 정확히 해석할 수 있다. 그림 4는 98 MHz에



(a) 표적까지의 왕복거리 (b) 도플러 주파수  
(a) Round trip distance to the target (b) Doppler frequency



(c) 시간 지연 도플러 효과와 도플러 주파수 곱의 차이  
(c) Difference between time delay and product of Doppler frequency

그림 4. 도플러 효과 분석

Fig. 4. Analysis of Doppler effect.

서 전파의 입사방향(화살표)에 따른 표적의 바이스테틱 RCS를 나타낸다. 표적은 PEC 구조위에 두께 1 mm인 RAM 도료가 있을 경우와 없을 경우에 대해 각각 분석을 하였다. FM 대역에서는 두 RCS가 2 dB 이내로 거의 동일하므로 FM 방송을 이용하는 PCL장비가 저피탐 스텔스 기능의 표적도 탐지가 가능함을 확인하였다. 본 연구에서는 각기 다른 표적의 바이스테틱 RCS를 분석하여 DB로 활용하였으며, 사용자가 임의로 RCS를 지정하거나 추가할

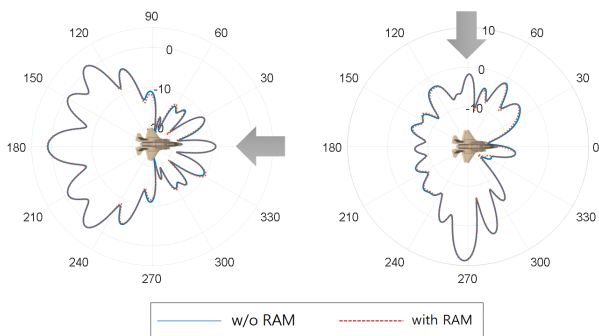


그림 5. RAM 도료 유무에 따른 FM 대역 RCS 분석 결과  
Fig. 5. RCS with and without RAM in FM band.

수 있도록 구성하였다.

### 3-4 배열 안테나의 어레이 매니폴드

주장비는 배열 안테나를 이용하여 FM 방송신호와 표적반사신호를 수신한다. 따라서 본 연구에서도 안테나의 어레이 매니폴드를 이용하여 각각의 안테나로 수신한 전파를 모델링하였다. 안테나는 FM 방송대역에서 반파장 길이를 갖는 다이폴을 적용한 원형 배열안테나이다. 그림 6은 각각 89 MHz에서 측정된 어레이 매니폴드(실선)와 시뮬레이션(점선) 결과를 나타내며, 두 결과가 서로 잘 일치한다. 또한 안테나 사이의 커플링 효과에 의해 다소 찌그러지는 구간이 발생한다. 이는 안테나로 입사되는 전파를 정확히 모델링하기 위해서는 안테나 간 커플링 효과를 고려해야 함을 의미한다. 안테나를 통해 수신된 신호는 다음과 같다.

$$y_{ch1} = y_{ref}AF_{ch1}(\phi_{ref}) + \sum_{k=1}^N y_{dutter,k}AF_{ch1}(\phi_{dutter,k}) + \sum_{l=1}^M y_{target}AF_{ch1}(\phi_{target,l}) \quad (12)$$

여기에서  $y_{ch1}$ 은 1번 안테나를 통해 수신하는 IQ데이터를 의미한다. 따라서 기준신호와  $N$ 개의 클러터신호,  $M$ 개의 표적신호가 각각 도래각  $\phi$ 에 따른 어레이매니폴드  $AF(\phi)$ 를 곱한 후 이를 더해서 구해진다.

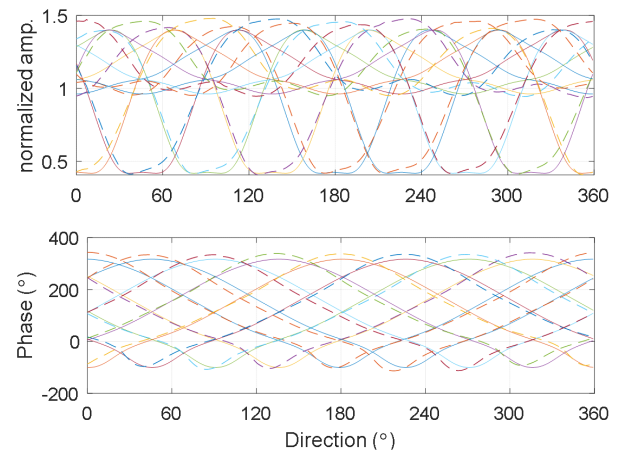


그림 6. 배열 안테나의 어레이 매니폴드  
Fig. 6. Array manifolds of array antenna.

#### IV. 모의신호 분석

최종적으로 IQ생성기에서 발생한 IQ신호가 적절히 PCL 신호를 모의하는지 확인하기 위해 ARD (Amplitude Range & Doppler) 지도를 도시하였다. 음성신호는 다양한 주파수 성분이 포함되어 있는 음악신호를 이용하였으며, 사용된 샘플은 약 0.15초 가량이다. ARD 지도는 다음과 같이 계산된다<sup>[10]</sup>.

$$ARD(\tau, f_d) = \left| \int y_{ref}(t) y_{target}^*(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \right| \quad (13)$$

이때 도플러 주파수의 편이현상을 간단히 검증하기 위해 클러터 반사신호는 제외하였다. 표적은 'x'로 나타내었으며, ARD 지도에서 표적이 적절히 모의된 것을 확인할 수 있다. 다만 표적이 위치하지 않는 부분에서도 값이 크게 표시되어 모호성이 증가된 부분들이 있다. 이는 이러한 모호성이 적도록 송신신호를 설계할 수 있는 능동형 레이더와 달리 임의의 FM 방송신호를 이용해야 하는 수동형 레이더이기 때문인 것으로 사료된다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 FM 방송신호를 이용한 PCL 장비의 산란신호 모의를 위한 방법을 서술하였다. Ray-tracing기법을 이용하여 송신소-수신기 사이의 주변환경에 의한 클러터

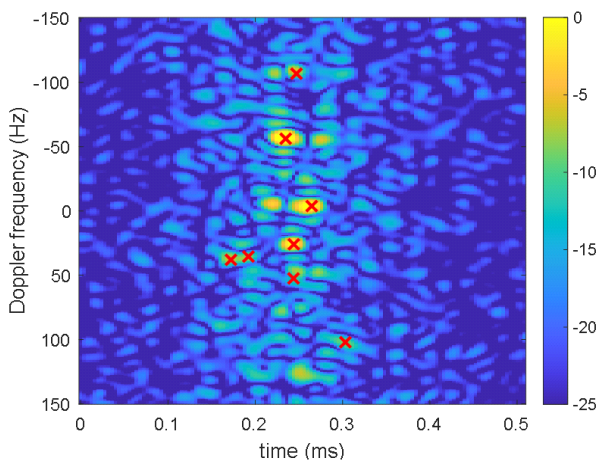


그림 7. 모의 PCL 산란신호에 대한 ARD map

Fig. 7. ARD map for the proposed modeling of PCL signal.

신호를 모의하고, 측정값과 유사함을 보였다. 또한 표적 반사신호의 경우, 시간에 따라 변하는 도플러 효과를 정확히 고려하기 위해 IQ데이터를 시간영역에서 지연시키는 방법을 제안하였다. 또한 EM 시뮬레이션 툴을 이용하여 대표적인 표적의 RCS를 DB로 구축하고, 안테나의 어레이 매니폴드를 고려한 산란신호 모의를 수행하였다. 최종적으로 ARD 지도를 도시하여 표적의 반사신호가 적절히 모의된 것을 확인하였다. 추후 본 논문에서 설명된 산란신호 모의기법은 운용 S/W 및 모의신호 발생기와 통합되어 PCL 개발지원장비를 구성하게 된다. 그리고 이를 기반으로 PCL 주장비의 RF 성능 테스트, 클러터 및 기준신호 제거 테스트, 안테나 지향 테스트 등 성능 시험에 사용될 예정이다.

#### 사 사

본 연구에서 사용된 WIPL-D와 Wireless Insite 프로그램 평가판과 도움을 제공해 주신 (주)모아소프트의 정한길 이사님과 지성환 팀장님에게 감사를 드립니다.

#### References

- [1] P. E. Howland, D. Maksimiuk, and G. Reitsma, "FM radio based bistatic radar," *IEEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, no. 3, pp. 107-115, Jun. 2005.
- [2] Y. L. Lu, D. K. P. Tan, and H. B. Sun, "Air target detection and tracking using a multi-channel GSM based passive radar," in *2007 International Waveform Diversity and Design Conference*, Pisa, 2007, pp. 122-126.
- [3] M. Malanowski, K. 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.
- [4] B. Dawidowicz, P. Samczynski, M. Malanowski, J. Misiurewicz, and K. S. Kulpa, "Detection of moving targets with multichannel airborne passive radar," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 27, no. 11, pp. 42-49, Nov. 2012.
- [5] J. Brown, K. Woodbridge, H. Griffiths, A. Stove, and S.



- Watts, "Passive bistatic radar experiments from an airborne platform," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 27, no. 11, pp. 50-55, Nov. 2012.
- [6] S. Choi, D. F. Crouse, P. Willett, and S. Zhou, "Approaches to Cartesian data association passive radar tracking in a DAB/DVB network," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 1, pp. 649-663, Jan. 2014.
- [7] A. Zaimbashi, M. Derakhshan, and A. Sheikhi, "Invariant target detection in multiband FM-based passive bistatic radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 1, pp. 720-736, Jan. 2014.
- [8] *Broadcasting Standards and Wireless Apparatus for Broadcasting Services*, Ministry of Science and ICT, Notice 2017-7.
- [9] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons, p. 79, 1998.
- [10] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design using Matlab*, Chapman and Hall/CRC, pp. 28, 202-203, 2013.
- [11] M. I. Skolnik, "An analysis of bistatic radar," *IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics*, vol. ANE-8, no. 1, pp. 19-27, Mar. 1961.
- [12] Remcom, "Wireless insite," 2019. Available: <https://www.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software>
- [13] Mathworks, Inc., "Matlab R2019b," 2019. Available: <https://www.mathworks.com>
- [14] WIPL-D Pro, "WIPL-D Pro," 2019. Available: <https://wipl-d.com/products/wipl-d-pro>

조 치 현 [한국표준과학연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2506-576X>



2004년: 홍익대학교 전자공학과 (공학사)  
2006년: 홍익대학교 전자공학과 (공학석사)  
2009년: 홍익대학교 전자공학과 (공학박사)  
2009년~2012년: 삼성탈레스 전문연구원  
2012년~현재: 한국표준과학연구원 전자  
기표준센터 책임연구원  
2017년: 미국 국립표준기술연구소(NIST)

객원연구원

2016년~2017년: 국가과학기술자문회의 정책연구원

[주 관심분야] RF Waveform · 디지털 통신신호 · 전자파 측정  
표준, 초고주파 회로 및 안테나 설계 등

임 상 훈 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9902-9513>



2009년: 숭실대학교 정보통신전자공학부  
(공학사)  
2011년: 한국과학기술원 전기 및 전자공  
학과 (공학석사)  
2016년: 한국과학기술원 전기 및 전자공  
학과 (공학박사)  
2016년~현재: 한화시스템 전문연구원

[주 관심분야] 신호처리, 시스템 최적화 등

심 홍 석 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1145-1707>



2005년: 충북대학교 컴퓨터공학과 (공학사)  
2008년: 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)  
2007년~현재: 한화시스템 전문연구원  
[주 관심분야] ELINT/COMINT 신호분석,  
신호처리 등

박 준 식 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7217-0944>



2014년: 전북대학교 전자공학과 (공학사)  
2016년: 전북대학교 전자공학과 (공학석사)  
2016년~현재: 한화시스템 선임연구원  
[주 관심분야] 초고주파회로 및 안테나 설  
계, 디지털 신호처리, 전자전시스템 설  
계/구현 등

곽 현 규 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7972-3038>



2007년: 충남대학교 정보통신공학과(공학사)

2009년: 충남대학교 정보통신공학과(공학석사)

2009년~현재: 국방과학연구소(ADD)선임연구원

[주 관심분야] 전자전, 통신, 신호처리, 위

차탐지 등

이 중 환 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1162-0531>



1999년 2월: 충남대학교 전파공학과(공학사)

2001년 2월: 충남대학교 전파공학과(공학석사)

2001년 1월~현재: 국방과학연구소(ADD)선임연구원

[주 관심분야] 전자전, 안테나 등