

## 완전 디지털 능동배열 레이다를 위한 빔 도메인 국부 적응 빔 형성 기법

### Beam Domain Localized Adaptive Beamforming for Fully Digital Active Array Radar

양은정 · 장윤희 · 김우성 · 염동진

Eunjung Yang · Youn Hui Jang · Woosung Kim · Dongjin Yeom

#### 요 약

간섭 환경에서 레이다 시스템의 성능을 위하여 적응 빔 형성(adaptive beamforming) 기법은 필수적이다. 안테나 소자 개수가 많은 완전 디지털 능동배열 레이다(fully digital active array radar)의 경우, 실제 시스템에 실시간 적용하기 위한 방안이 필요하다. 본 논문에서는 완전 적응 빔 형성의 성능을 유지하면서 시스템 적용성을 고려한 LCMV(linear constrained minimum variance) 기반의 빔 도메인 국부 적응 빔 형성 알고리즘을 제안하였다. 수동 수신 신호(passive listening received signal)를 이용하여 재머의 탐지 및 각도 추정을 수행하고, 재머 정보와 선형 제약 조건(linear constraints)을 기반으로 신호를 빔 도메인으로 국부화하여 차수를 줄인다. 간섭 신호의 공분산 행렬 추정과 적응 빔 형성은 낮은 차수의 빔 도메인에서 수행함으로써 실시간성 및 적용성을 보장한다. 제안한 알고리즘의 성능 확인을 위하여, 재밍 신호가 존재하는 환경에서 신호대간섭잡음비 손실(signal to interference noise plus ratio loss, SINR loss)과 최대 부엽 수준 관점에서 완전 적응 빔 형성 결과와 비교, 분석하였다.

#### Abstract

Digital adaptive beamforming is applied to the radar system to ensure system performance in an interference environment. For real time application to an actual radar system with a large number of antenna elements, the dimensions of the adaptive beamforming coefficient must be reduced. In this paper, we propose a beam domain localized adaptive beamforming algorithm based on linear constrained minimum variance (LCMV) that considers system applicability while maintaining the performance of fully adaptive beamforming. Jammer detection and angle estimation are performed using a passive listening signal, and the dimensions are reduced by localizing the signal to the beam domain based on jammer information and pre-determined linear constraints. Estimation of the interference covariance matrix and adaptive beamforming are performed in the reduced beam domain to ensure real-time operation and applicability. To verify the performance of the proposed algorithm, we analyzed the results compared to the fully adaptive beamforming in terms of signal-to-interference plus noise ratio (SINR) loss and maximum side lobe level in the presence of a jamming signal.

Key words: Fully Digital Active Array Radar, Adaptive Beamforming, Digital Beamforming, Reduced Beam Domain

국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

· Manuscript received February 16, 2021 ; Revised March 29, 2021 ; Accepted March 31, 2021. (ID No. 20210216-017)

· Corresponding Author: Eunjung Yang (e-mail: ejyang@add.re.kr)

## I. 서 론

위상 배열 레이더는 다수의 소자에 서로 다른 위상(phase) 및 크기(amplitude)의 가중치(weight)를 적용하여 전파를 송수신한다. 이 같은 빔 형성(beamforming)을 통해 탐색 영역의 여러 표적을 동시에 탐지/추적할 수 있기 때문에 다기능 레이더에 사용된다. 완전 디지털 능동배열 레이더는 그림 1과 같이 각 소자 단위로 신호를 디지털화하여 디지털 단에서 빔 형성을 수행한다. 이는 기존의 아날로그 형태의 빔 형성 방식과 비교하여 감도가 개선되고, 빔 형성에 있어 자유도가 늘어난다는 장점이 있다. 특히 아날로그 단에서 부배열(subarray)을 합성한 후 디지털화하여 빔 형성하는 방식과 비교하면 빔 조향 및 부엽 레벨 성능 측면에서 장점이 있다<sup>[1]</sup>. 최근 디지털 변환 칩의 발전과 함께 완전 디지털 능동배열 레이더로의 변화는 가속되고 있다.

한편, 제밍 환경에서 레이더 성능을 보장하기 위하여 적응 빔 형성(adaptive beam forming, ABF) 기능이 필요하다. 이는 배열 소자의 가중치를 조절하여 제밍 방향으로 널(null)을 형성함으로써 제밍 신호를 제거한다. 완전 디지털 능동배열 레이더의 경우, 최적의 성능을 위하여 모든 안테나 소자의 가중치를 적응적으로 조절하는 완전 적응 빔 형성(fully adaptive beamforming)이 가능하다. 이는 성능 면에서 가장 우수하지만 실제 레이더 시스템에서는 소자의 개수가 적게는 수백에서, 많게는 수만에 이르므로 실제 적용하기에는 계산량, 훈련 데이터 및 통신

량 측면에서 제약이 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 적응 빔 형성 계수의 차수(dimension)를 줄이기 위한 다양한 방안이 연구되었다.

우선 소자 단위의 공간 도메인(domain)에서 부배열을 구성하여 적응 빔을 형성할 수 있다. 이 때 디지털 영역에서 부배열을 구성하므로, 부배열 설계에 대한 물리적인 제약이 없다. 이 같은 설계 유연성을 이용하여 부배열 적응 빔 형성의 문제점인 그레이팅로브 및 그레이팅 노치 문제를 해결할 수 있다. 하지만 부배열 합성으로 인해 완전 디지털 능동배열 레이더 구조의 장점을 모두 얻을 수는 없다<sup>[2]</sup>.

빔 도메인(beam domain)에서 차수를 줄이기 위한 연구도 다양하게 진행되었다<sup>[3]~[5]</sup>. 이들 연구는 적응 빔 형성이 아닌 표적의 입사각도 추정을 목적으로 하므로 빔 도메인에서 차수를 줄일 때 이 목적을 염두에 두고 진행한다. 또한 최적화를 위한 반복 계산이 들어가므로 실제 적용하기에는 무리가 있다. 레이더 시스템에 적용하기 위하여, 참고문헌 [6]에서는 적응 빔 형성 알고리즘으로 부엽 제거 알고리즘(sidelobe canceller, SLC)<sup>[7]</sup>을 적용하고, 디지털 단의 소자를 조합하여 주 채널(main channel)과 보조 채널(auxiliary channel)로 구성한다. 이 경우, 주 채널 및 보조 채널 형성을 일종의 빔 도메인으로의 변환으로 볼 수 있고, 채널 형성의 자유도 측면 및 주 채널 형성에서 완전 디지털 능동배열 레이더 구조의 장점을 가진다. 하지만 적응 빔 형성 알고리즘을 SLC로 한정하였고, 보조 채널의 설계에 따른 성능의 차이가 존재한다.

본 논문에서는 기존의 연구들의 한계점인 성능 저하 문제를 해결하기 위하여 빔 도메인 국부 적응 빔 형성 알고리즘을 제안하였다. 이는 완전 디지털 능동배열 레이더의 완전 적응 빔 형성과 성능면에서 거의 유사하며, 훨씬 적은 차수를 사용하여 시스템 적용성 측면에서 우수하다. 기본 아이디어의 동기는 참고문헌 [8]의 joint domain localized(JDL) 알고리즘으로, 실제 시스템을 위한 빔 형성 알고리즘으로 제안하였다. 빔 형성 알고리즘은 확장성을 고려하여 LCMV(linear constrained minimum variance)<sup>[7]</sup>를 사용하였고, 제밍 정보와 원하는 선형 제약 조건(linear constraints)을 기반으로 신호를 빔 도메인으로 국부화하여 차수를 줄인다. 제밍 정보를 얻기 위한 실제적인 방법과

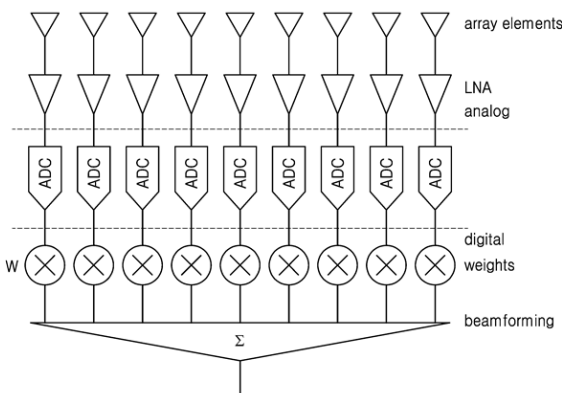


그림 1. 완전 디지털 능동배열 레이더 구조  
Fig. 1. Structure of fully digital active array radar.

부엽 레벨을 낮추기 위한 윈도우(window) 적용방법을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 제밍 신호가 존재하는 환경을 가정한 후, 신호대간섭잡음비 손실(signal to interference plus noise ratio loss, SINR loss)과 최대 부엽 수준 관점에서 완전 적응 빔 형성 결과와 비교, 분석하였다.

## II. 신호 모델 및 적응 빔 형성 알고리즘

### 2-1 신호 모델

그림 2와 같이  $N$ 개의 소자를 가지는 1차원 선형 안테나(uniform linear array)를 가정하였을 경우, 표적과  $K$ 개의 재머로부터 수신된 신호는 다음과 같이  $N \times 1$  벡터로 모델링할 수 있다. 본 논문에서 행렬(matrix)은 굵은 영문 대문자, 열벡터(column vector)는 굵은 영문 소문자로 표시하였다.

$$\mathbf{x}(t) = s_t(t)\mathbf{v}(\theta_t) + \sum_{k=1}^K s_{jk}(t)\mathbf{v}(\theta_{jk}) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

$s_t(t)$ 와  $s_{jk}(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 표적과  $k$ 번째 재머의 복소 포락선(complex envelope)을 각각 나타내고, 통계적으로 서로 독립적이다.  $\theta_t$ 와  $\theta_{jk}$ 는 표적과  $k$ 번째 재머의 입사 각도이고,  $\mathbf{v}(\theta)$ 는 각도  $\theta$ 에 대한 배열 매니폴드 벡터(array manifold vector)로 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{v}(\theta) = \left[ 1, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta)}, \dots, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta)(N-1)} \right]^T \quad (2)$$

이때,  $d$ 는 안테나 소자 간 간격,  $\lambda$ 는 파장,  $(\cdot)^T$ 는 벡터 전치(transpose)이다.  $\mathbf{n}(t)$ 는 zero mean white Gaussian 노이즈로 공분한 행렬은  $\sigma_n^2 \mathbf{I}$ 이다.

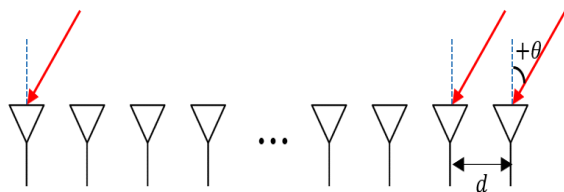


그림 2. 선형 안테나의 구조

Fig. 2. Structure of uniform linear array radar.

### 2-2 Linear Constraint Minimum Variance 알고리즘

LCMV는 적응 빔 형성 알고리즘의 하나로 식 (3)과 같이 선형의 제한조건을 만족하면서 출력의 분산(variance)을 최소화하는 방법이다.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}} \{ & \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \} \quad s.t. \quad \mathbf{C}^H \mathbf{w} = \mathbf{f} \\ \mathbf{w} = & \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C} [\mathbf{C}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}]^{-1} \mathbf{f} \end{aligned} \quad (3)$$

이때,  $\mathbf{R} = E[\mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^H]$ 은 간섭 신호  $\mathbf{x}_i$ 의 공분산 행렬,  $\mathbf{C}$ 는 선형 제약 조건행렬,  $\mathbf{f}$ 는 응답 벡터이다.

선형 제한조건은 적응 빔 형성의 출력 응답에 조건을 주는 것으로, 특정 방향의 응답을 원하는 값으로 설정하는 것이 대표적이다. 식 (4)는 방향 제한조건의 예로, 원하는 방향  $\theta_0$ 에 대한 출력 응답은  $g$ 로 유지하고,  $\theta_c$  방향에 대한 응답을 0으로 둔다.

$$\mathbf{C}^H \mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}^H(\theta_0) \\ \mathbf{v}^H(\theta_c) \end{bmatrix} \mathbf{w} = \begin{bmatrix} g \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{f} \quad (4)$$

이 때  $(\cdot)^H$ 는 켤레 전치(conjugate transpose)이다.

여기서 선형 제약 조건의 수를  $M$ 으로 두면,  $N \times M$  선형 제약조건 행렬과  $M \times 1$  응답 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_M], \quad \mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_M]^T \quad (5)$$

한편, LCMV는 generalized sidelobe canceller(GSC)의 형태로 표현할 수 있다. GSC 구조는 여러 적응 빔 형성 알고리즘의 일반화된 형태이므로<sup>[7]</sup>, LCMV를 기준으로 제안된 알고리즘은 다양한 빔형성 알고리즘으로 확장 가능하다.

## III. 빔 도메인 국부 적응 빔 형성(Beam Domain Localized ABF) 알고리즘

완전 디지털 능동배열 레이더에서는 그림 1이나 그림 3의 왼쪽과 같이 모든 소자에 대한 가중치를 적용하는 완전 적응 빔 형성이 가능하다. 이는 성능 면에서 가장 우수하지만, 실제 레이더 시스템에서는 소자의 개수가 많아지면 완전 적응 빔 형성을 적용하기에는 제약이 따른다. 우선 식 (3)의  $\mathbf{R}^{-1}$ 을 구하기 위해서는  $N \times N$ 크기의 행렬  $\mathbf{R}$ 의 역행렬을 구해야 하는데,  $N$ 이 크면 계산량 ( $O(N^3)$ )

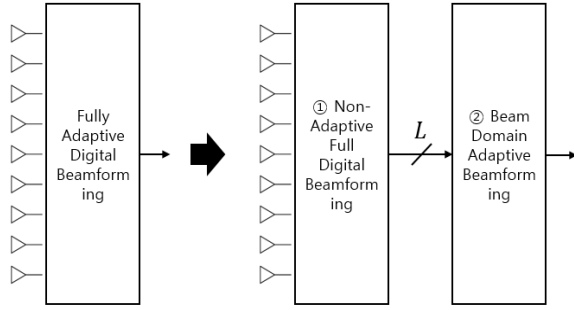


그림 3. 빔 도메인 국부 적응 빔 형성  
Fig. 3. Beam domain localized ABF.

측면에서 실시간 적용이 어렵다. 또한 실제 환경에서는 훈련 데이터를 기반으로  $\mathbf{R}$ 을 추정해야 하는데, 이 때 필요한 데이터 개수는 자유도(dgree of freedom, DOF)의 2~3배로 완전 적응 빔 형성의 경우, 자유도가  $N$ 이므로  $2N \sim 3N$ 이 필요하다<sup>[9]</sup>. 이 역시  $N$ 이 크면 현실적으로 데이터를 얻기 힘들다.

본 논문에서는 실제 완전 디지털 능동배열 레이다 시스템에 적용 가능한 빔 도메인 국부 적응 빔 형성 알고리즘을 제안하였다. 그림 3의 오른쪽과 같이 두 단계로 나누어, 우선 디지털 소자 단위의 신호가 국부화되도록 빔 도메인으로 변환한 후 자유도를  $L(< N)$ 으로 줄인다. 이 과정은 주어진 정보를 이용하여 비적응적으로 수행된다. 이후 차원이 줄어든 빔 도메인에서 간섭 신호를 제거하는 적응 빔 형성을 적용한다. 빔 도메인 적응 빔 형성 가중치는 다음의 식 (6)과 같다. 이는 앞에서 설명한 LCMV 가중치로 다만 빔 도메인 신호를 사용한다는 차이가 있다.

$$\mathbf{w}_B = \mathbf{R}_B^{-1} \mathbf{C}_B [\mathbf{C}_B^H \mathbf{R}_B^{-1} \mathbf{C}_B]^{-1} \mathbf{f} \quad (6)$$

이 때,  $\mathbf{w}_B$ 는  $L \times 1$  빔 도메인 가중치이고, 차원  $L$ 의 빔 도메인 변환 행렬을  $\mathbf{T}(N \times L)$ 라고 하면 선형 제한조건 행렬은  $\mathbf{C}_B = \mathbf{T}^H \mathbf{C}$ , 공분산 행렬은  $\mathbf{R}_B = \mathbf{T}^H \mathbf{R} \mathbf{T}$ 이다. 아래 첨자  $B$ 는 변환된 빔 도메인을 의미한다.

빔 도메인 국부 적응 빔 형성 알고리즘에서는 자유도가  $N$ 에서  $L$ 로 줄어들었기 때문에  $N \times N$  공분산 행렬 대신  $L \times L$  공분산 행렬의 역행렬을 구하고, 공분산 행렬 추정에 필요한 훈련 데이터 역시  $2L \sim 2L$ 개로 줄일 수 있으므로 실제 적용성 측면에서 뛰어나다.

### 3-1 재머 정보가 있는 경우, 빔 선정

한편, 재머를 제거하기 위해서는 최소한 재머의 개수만큼의 자유도가 가용해야 한다. 또한 제한 조건을 만족하기 위해서는 제한 조건의 개수만큼의 자유도가 필요하다. 이 사실로부터,  $K$ 개의 재머가 존재하는 환경에서 재머 정보를 미리 알고 있는 경우, 선형 제한 조건 행렬과 재머 각도 정보를 이용하여 빔 도메인 변환 행렬  $\mathbf{T}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{T} = [\mathbf{C}, \mathbf{T}_J] \quad (7)$$

$$\mathbf{T}_J = [\mathbf{v}(\theta_{j1}), \dots, \mathbf{v}(\theta_{jK})] \quad (8)$$

이와 같이 재머 정보를 미리 알고 있다면, 재머 개수와 제한조건 개수를 더한  $L = K + M$ 개의 자유도만을 이용하여 완전 적응 빔 형성과 동일한 성능(재머 제거 및 부엽 성능)을 얻을 수 있다. 하지만 실제 환경에서는 재머의 정보를 알 수 없으므로 이를 수신 신호로부터 추정해야 한다.

### 3-2 재머 정보가 없는 경우, 빔 선정

시스템에 따라서는 재머 관리를 위하여 운용상 일정 주기마다 신호를 수신하여 재머를 탐지/추적하고, 각도에 따른 맵(map)을 형성한다. 따라서 이와 같은 시스템에서는 재머 맵 정보를 이용하여 빔을 선정할 수 있다. 하지만 재머 맵 갱신 주기가 길어지면 실시간 재밍 환경을 반영하지 못하는 경우가 발생한다. 재머의 정보를 미리 알 수 없는 상황에서는 수신 신호만으로 재머를 탐지하고, 방향을 추정하여 빔을 선정한다. 재머 정보 추정을 위한 알고리즘은 다양하지만, 실제 시스템 적용성을 고려하여 적은 샘플과 적은 연산량을 사용하는 fast fourier transform (FFT)을 기반으로 한 방법을 사용한다.

그림 2와 같은 1차원 선형 안테나를 가정하였을 경우, 수신 신호의 각도 추정을 위해서 후보(candidate) 각도  $\theta_k$ 에 대한 배열 매니폴드 벡터와 수신신호 벡터  $\mathbf{x}$ 와의 복소 벡터 내적(complex vector inner product)를 구하면 다음의 식 (9)와 같다.

이는 정합필터(matched filter) 결과로 수신 신호의 각도가  $\theta_k$ 에 가까울수록 값이 커진다.

$$X[\theta_k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_k) n} \quad (9)$$

이때,  $(d/\lambda) \sin(\theta_k) = k/N$ 으로 대응하면 식 (9)는 식 (10)의 discrete Fourier transform(DFT)에 대응될 수 있다. 즉, FFT를 통해 안테나 소자 단위의 공간 도메인 수신 신호를 각도 도메인(빔 도메인)으로 변환할 수 있다.

다만 DFT(FFT)를 그대로 사용할 경우, 후보 중심 각도(candidate center angle)는  $u = \sin(\theta)$  도메인에서 등 간격  $\Delta u = (\lambda/(dN))$ 으로 안테나 소자 개수만큼 사용할 수 있다. 이는 2차원의 면형 안테나에 대해서도 2차원 FFT로 확장할 수 있다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}, k=0,1,\dots,N-1 \quad (10)$$

재머 탐지를 위하여 FFT 결과인  $|X[k]|^2$ 에서 문턱치(threshold)를 넘는 정점(peak) 값을 찾는다. 이렇게 찾는 정점의 개수가 총 재머의 개수이고, 해당되는  $\theta_k = \sin^{-1}((k/N)(\lambda/d))$ 를 재머의 각도로 취한다.

일반적으로 시스템 요구사항 및 빔의 부엽 레벨을 고려하여 적응 빔 형성으로 제거하기 원하는 재머의 목표 재머대 잡음비(jammer to noise ratio, JNR)가 주어진다. 재머 탐지를 위한 문턱치는 이를 고려하여 노이즈 레벨 대비 값을 정한다. 부엽 재머가 존재하는 환경에서 시스템 측면의 신호대간섭잡음비 손실을  $L$  dB만큼 허용한다고 가정한다. 비 적응형 0 빔 형성의 정지 빔(quiescent beam) 신호대잡음비(signal to noise ration, SNR) 이득이  $G_{SNR}$  dB, 최대 부엽 레벨(sidelobe level)이  $SLL$  dB인 경우,  $JNR_o$  dB 이상인 재머는 탐지하여 제거해야 한다.

$$JNR_o = 10 \log_{10} (10^{(L/10)} - 1) - G_{SNR} + SLL \quad (11)$$

실제  $JNR_o$  이하의 재머는 적응 빔 형성을 사용하지 않아도 허용 가능한 수준의 신호대간섭잡음비 손실을 가진다. 따라서 FFT를 사용하여 재머를 탐지할 때, 이를 기준으로 문턱치를 정한다.

$$threshold_{dB} = JNR_o + G_{FFT} - L_{straddle} - Margin \quad (12)$$

이 때,  $G_{FFT} = 10 \log_{10}(N)$  dB는 FFT의 신호대잡음비 이득,  $L_{straddle}$  dB는 FFT 최대 스트래들 손실(straddling loss),

마진(margin)은 재머가 2개 이상인 경우를 고려하여 정한다. 이때  $threshold_{dB}$ 는 노이즈 레벨( $\sigma_n^2$ )을 기준으로 한 값으로 선형 스케일에서는  $threshold = 10^{threshold_{dB}/10} \times \sigma_n^2$ 이다.

FFT를 이용하여 찾은  $\theta_k$ 는 실제 재머의 각도에 대하여 양자화 오차(quantization error)가 존재한다. 본 논문에서는 보편성을 해치지 않는 선에서 편의를 위해  $d = \lambda/2$ 로 가정하였고, 이 경우,  $u$  도메인에서 추정 각도의 간격은  $\Delta u = 2/N$ , root mean square error(RMSE)는  $1/(\sqrt{3} N)$ 이다. 이로 인해 적응 빔 형성 알고리즘의 부엽 특성이 나빠진다.

FFT를 적용함에 있어서, 이론적으로는 1개의 수신 신호 샘플만으로도 재머 탐지 및 방향 추정이 가능하다. 하지만 성능의 안정성을 위하여 여러 샘플을 사용하여 평균할 수 있다. 시스템의 계산 능력과 원하는 안정성에 따라 샘플 수를 결정하면 된다.

한편,  $K$ 개의 재머가 각도 측면에서 서로 충분히 떨어져 있다면 FFT를 사용하여 모든 재머를 탐지할 수 있다. 하지만 두 재머가 가까이 위치하여 FFT의 분해능 안에 함께 들어와 서로 구분되지 않는 경우가 발생한다. 이 경우에는 실제 재머보다 적은 개수의 재머를 탐지하고, 이에 따른 자유도를 적용하게 되므로 재머 제거 성능이 떨어진다. 이를 방지하기 위하여 추정된 각도( $u_{jk}$ )에 그를 중심으로 좌우 각도( $u$  도메인)  $u_{jk} \pm 1/N$ 에 해당되는 빔을 추가하여 한 재머 당 3빔(3개의 자유도)을 할당하면 안정성을 확보할 수 있다. 또한 추가 자유도를 사용하면 부엽 특성 열화도 보완할 수 있다. 하지만  $N$ 이 크면 FFT의 분해능이 좋아지므로 이런 경우는 드물게 나타난다. 따라서 FFT를 통해 탐지된 재머의 개수와  $N$ , 시스템의 계산 능력을 고려하여 상황에 따라서 재머 당 할당 자유도를 정할 수 있다.

### 3-3 윈도우 적용

한편, LCMV에서 부엽 레벨 감소를 위한 윈도우를 적용하기 위해서는 식 (3)에 공분산 행렬  $R$ 를  $H^{-1}R$ 로 대체하면 된다. 이 때 행렬  $H$ 는 대각(diagonal) 행렬로 윈도우 벡터  $w_q$ 로부터  $H = \text{diag}(|w_q|)$ 와 같이 얻는다<sup>[2]</sup>. 제안

한 알고리즘에는 여기에 추가로  $T$ 에서  $C$ 를 사용하는 대신  $HC$ 를 사용하여  $T = [HC, T_r]$ 와 같이 적용하면 윈도우가 적용된 결과를 얻을 수 있다.

그림 4는 앞서 설명한 알고리즘을 시스템 적용 관점에서 한 버스트의 파형 타이밍과 함께 신호 흐름에 따라서 정리한 것이다. 적응 빔 형성을 적용하는 레이다 시스템에는 일반적으로 송신 전에 수동 수신구간(passive listening period)이 존재한다. 이 구간의 수신 신호를 재머 탐지 및 각도 추정을 위한 부분과 공분산행렬 추정을 위한 부분으로 구분한다. 재머 탐지 및 각도 추정을 위해서는 완전 디지털 소자 단위의 신호가 필요하다. 이 때 필요한 샘플 수는 FFT의 안정성을 보장하는 정도로 적어도 된다(ex: 10개의 샘플). 탐지된 재머의 정보와 미리 정해진 선형 제한 조건을 기반으로 비적응 완전 디지털 빔형성(non-adaptive full digital beamforming) 모듈을 세팅하고, 이 후의 모든 수신 신호는 빔 도메인으로 변환된다. 한편, 공분산 행렬 추정을 위한 수동 수신 신호 역시 줄어든 자유도로 인해 적은 샘플만 얻으면 되므로 전체 수동 수신 구간은 짧아도 된다. 송신 이후의 수신 신호는 빔 도메인에서 적응 빔 형성이 적용되고, 이후 신호처리를 수행한다. 이 과정은 매 버스트마다 반복된다. 그림 4에서 빔 도메인으로의 변환은 신호처리기 전에 수행되어 신호처리기로는 빔 도메인 신호가 전달된다. 이로 인해 데이터의 양이 줄어들기 때문에 통신측면에서도 유리하다.

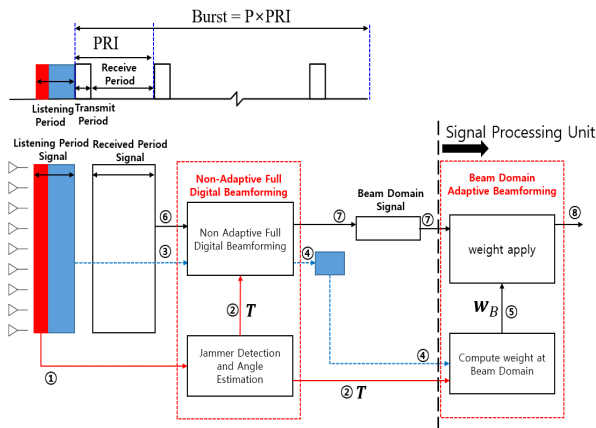


그림 4. 빔 도메인 국부 적응 빔 형성의 적용  
Fig. 4. Application of beam domain localized ABF.

#### IV. 성능 분석

본 논문에서 제안한 빔 도메인 국부 적응 빔 형성 알고리즘의 성능을 입증하기 위해서 그림 2와 같은 선형배열 안테나를 가정한다. 전체 배열 안테나의 소자 수는 32개, 소자간격은  $0.5 \lambda$ 이다. 저부엽 특성을 위해 Taylor 윈도우 30 dB를 적용하였으며, 편의를 위해서  $u$  도메인을 기준으로 분석하였다.

재머의 탐지 및 각도 추정을 위하여 10개의 신호 샘플을 이용하여 FFT한 결과를 평균하였다. 시스템에서 신호 대간섭잡음비 손실 3 dB를 허용한다면 식 (11)로부터 허용 가능한 재머  $JNR_o$ 은 15.6164 dB이다. 이 때,  $G_{SNR} = 14.363$  dB,  $L_{straddle} = 3.9$  dB,  $SLL = 30$  dB이다. 하나의 재머를 가정하면, 식 (12)로부터  $threshold_{dB}$ 는 26.7679이다.

LCMV에서 제한 조건 행렬에는 주빔의 방향 조건만 포함하였다.

제안한 알고리즘의 성능을 비교하기 위해서, 적응 빔 형성 출력의 신호대간섭잡음비 손실과 적응 빔 형성 패턴의 최대 부엽 레벨을 측정하였다. 이 때 재머의 입사 각도는 고정하고, 빔 형성 조향 방향을 바꾸어 가며 신호대간섭잡음비 손실과 최대 부엽 레벨을 측정한다. 조향 각은 표적의 각도와 동일하다고 가정한다. 조향 각  $\theta_t$ 에서의 적응 빔 형성 가중치  $w(\theta_t)$ 에 대한 출력 신호대간섭잡음비(SINR)를 식 (13)과 같이 정의할 수 있고,  $SNR_0(\theta_t)$ 는 노이즈 환경에서의 비적응 빔 형성 가중치  $w_0(\theta_t)$ 에 대한 출력 신호대잡음비로 식 (14)와 같다. 이는 적응 빔 형성 알고리즘의 성능 기준으로 식 (15)와 같이 신호대간섭잡음비 손실을 정의하여 성능 지표로 삼는다. 이 때,  $E(\cdot)$ 은 expectation 연산자이다.

$$SINR(\theta_t) = \frac{E|s_t(t)|^2 |w^H(\theta_t)v(\theta_t)|^2}{w^H(\theta_t)Rw(\theta_t)} \quad (13)$$

$$SNR_0(\theta_t) = \frac{E|s_t(t)|^2 |w_0^H(\theta_t)v(\theta_t)|^2}{\sigma_n^2 w_0^H(\theta_t)w_0(\theta_t)} \quad (14)$$

$$SINR_{Loss}(\theta_t) = \frac{SINR(\theta_t)}{SNR_0(\theta_t)} \quad (15)$$

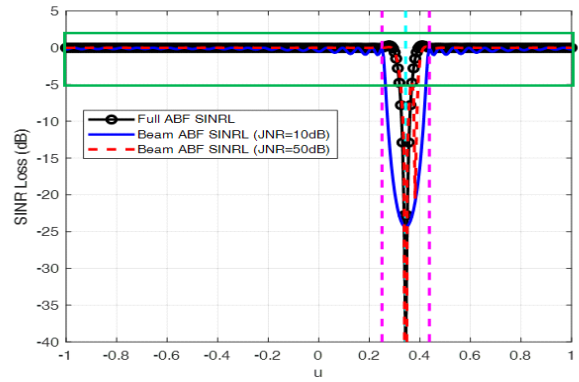
최대 부엽 레벨은 각 조향각마다 형성 빔의 최대 부엽

레벨을 찾아서 측정한다. 빔 도메인 국부 적응 빔 형성 기법의 성능은 완전 적응 빔 형성과 비교하였다.

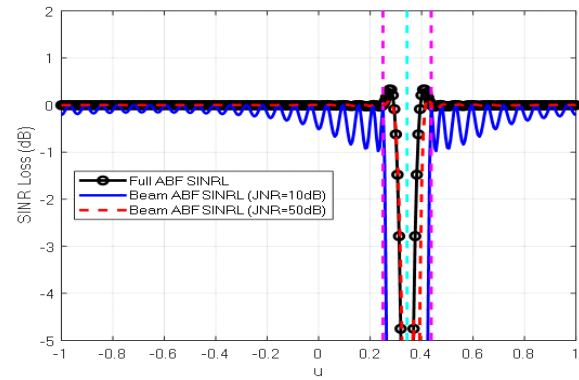
#### 4.1 하나의 재머 환경에서의 알고리즘 성능 분석

본 절에서는 1개의 재머 신호가  $u$ 도메인에서 0.3438로 입사하는 경우를 가정하였다. 이 각도는  $2/N$ 의 5.5배에 해당되는 값으로 재머 각도 추정 시 양자화 오차가 최대가 된다. 그림 5는 재머의 입사 각도는 고정하고, 재머대잡음비가 10 dB, 50 dB인 두 경우의 신호대간섭잡음비 손실과 최대 부엽 레벨을 조항각에 따라 측정한 결과를 보여준다. 이 때, 제안한 기법에서 재머대잡음비가 10 dB인 재머는  $JNR_0$  보다 작으므로 탐지되지 않고, 재머대잡음비가 50 dB인 재머는 탐지되어 적응 빔 형성을 적용한다. 그림 5(a)와 그림 5(b)는 신호대간섭잡음비 손실, 그림 5(c)는 최대 부엽 레벨을 나타낸다. 이 때, 하늘색 세로 점선으로 재머의 실제 각도, 분홍색 세로 점선으로 재머 각도를 중심으로 주엽의 널과 널 사이간격을 표시하였다. 그림 5(a)와 그림 5(b)로부터 재머대잡음비가 50 dB인 경우, 신호대간섭잡음비 손실 측면에서는 재머의 위치가 주엽의 널과 널 사이의 바깥에 위치하면 제안한 알고리즘이 완전 적응 빔 형성과 거의 동일한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만 최대 부엽 레벨 측면에서 재머의 위치가 주엽과 가까워지면 값이 커지는 것을 알 수 있다. 반면 재머대잡음비가 10 dB인 경우, 적응 빔 형성을 적용하지 않기 때문에 재머의 영향으로 신호대간섭잡음비 손실 측면에서 성능 열화가 있지만, 시스템에서 허용가능한 수준인 3 dB 이하이다. 최대 부엽 레벨은 정지 패턴의 부엽 레벨이 유지된다.

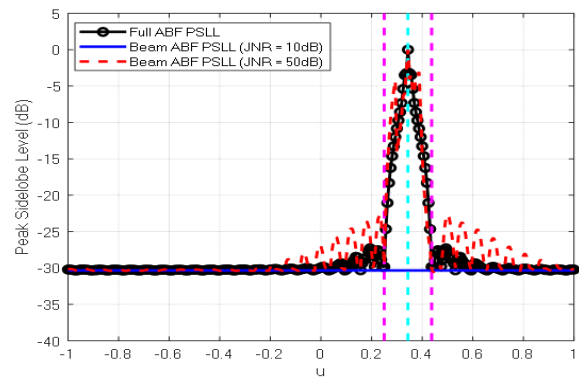
그림 6은 재머대잡음비에 따른 신호대간섭잡음비 손실 및 최대 부엽 레벨 성능을 나타낸 결과로 앞의 실험과 같은 조건에서 재머대잡음비를 0 dB에서 50 dB까지 5 dB간격으로 변경하면서 성능을 분석한 것이다. 이를 위해서 각 재머대잡음비마다 그림 5와 같은 표적 각도에 따른 결과를 도출하고, 재머를 중심으로 주엽 널과 널 사이를 제외한 영역의 신호대간섭잡음비 손실 중 최소값을, 같은 영역에서 최대 부엽 레벨 중 최대값을 대표 값으로 나타낸 것이다. 이때 실선으로 표시된 결과는 최소 신호대간



(a) 표적 각도에 따른 신호대간섭잡음비 손실  
(a) SINR loss according to target direction



(b) 표적 각도에 따른 신호대간섭잡음비 손실(확대)  
(b) SINR loss according to target direction

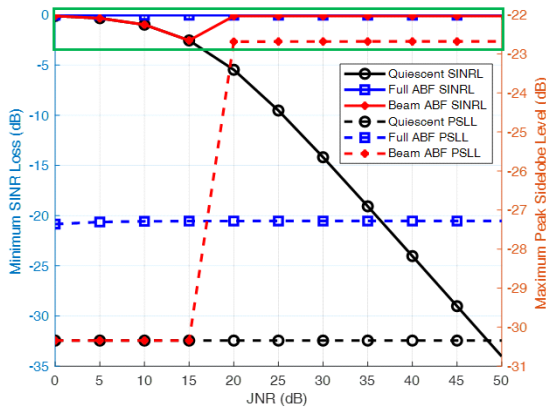


(c) 표적 각도에 따른 최대 부엽 레벨  
(c) Maximum sidelobe level according to target direction

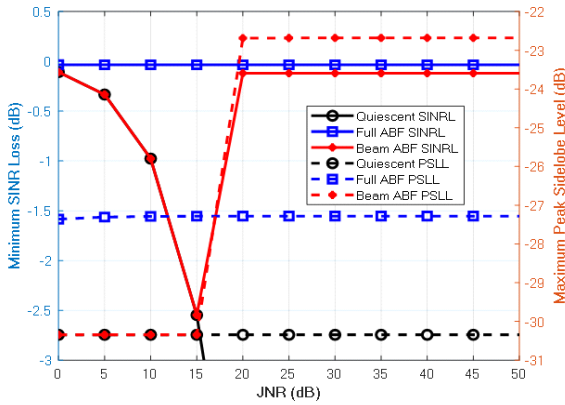
그림 5. 표적 각도에 따른 신호대간섭잡음비 손실 및 최대 부엽 레벨

Fig. 5. SINR loss and maximum sidelobe level according to target direction.





(a) 재머대잡음비 값에 따른 최소 신호대간섭잡음비 손실 값 및 최대 부엽 레벨  
(a) Minimum SINR loss and maximum sidelobe level according to JNR



(b) 재머대잡음비 값에 따른 최소 신호대간섭잡음비 손실 값 및 최대 부엽 레벨 (신호대간섭잡음비 손실 쪽 확대)  
(b) Minimum SINR loss and maximum sidelobe level according to JNR

그림 6. 재머대잡음비 값에 따른 최소 신호대간섭잡음비 손실 값 및 최대 부엽 레벨

Fig. 6. Minimum SINR loss and maximum sidelobe level according to JNR.

섭잡음비 손실을, 점선으로 표시된 결과는 최대 부엽 레벨을 나타내어 한 그림에 도시하였다. 결과에서 볼 수 있듯이, 재머대잡음비가 15.6164 dB 이하인 경우에는 재머의 탐지가 이루어지지 않아, 적응 빔 형성 알고리즘을 적용하지 않으므로 신호대간섭잡음비 손실과 부엽레벨 측면에서 비 적응 빔 형성의 성능과 동일하다. 이는 신호대

간섭잡음비 손실 측면에서는 적응 빔 형성을 적용하는 것보다 성능이 떨어지지만, 부엽 레벨 측면에서는 이득이 있다. 재머대잡음비가 15.6164 dB 이상인 경우에는 재머를 탐지하고, 각도를 추정하여 빔 도메인 국부 적응 빔 형성을 적용한다. 이 때, 신호대간섭잡음비 손실은 완전 적응 빔 형성과 비교하였을 때, 약 0.08 dB로 거의 차이가 없다(그림 6 (b)). 반면 부엽 레벨 측면에서는 완전 적응 빔 형성에 비해서 4.6 B 정도의 높은 부엽레벨을 가진다. 한편, 이 같은 부엽레벨은 재머의 방향에 따라 성능 차이를 보이는데, 이는 FFT를 사용한 재머 각도의 추정 오차로 인해 발생한다.

그림 7은 재머 각도 추정 오차에 따른 알고리즘 성능을 최소 신호대간섭잡음비 손실 및 최대 부엽 레벨을 기준으로 분석한 결과이다. 이 때 앞의 시뮬레이션과 동일한 조건을 바탕으로 재머대잡음비가 50 dB인 1개의 재머를 가정하고, 입사 각도를 FFT 양자화 간격  $2/N(5:0.01:5.5)$  배로 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 정규화된 재머 방향(normalized jammer direction)은 재머 각도를  $2/N$ 로 나눈 값을 의미한다. 재머 당 자유도를 1개 사용하는 경우, 결과에서 볼 수 있듯이 양자화 오차가 클수록 완전 적응 빔 형성과 비교하여 성능이 나빠진다. 하지만 만일 한 재머에 대하여 자유도를 3개 할당하면 빔 도메인 국부 적응 빔 형성 기법이 모든 영역에서 완전 적응 빔

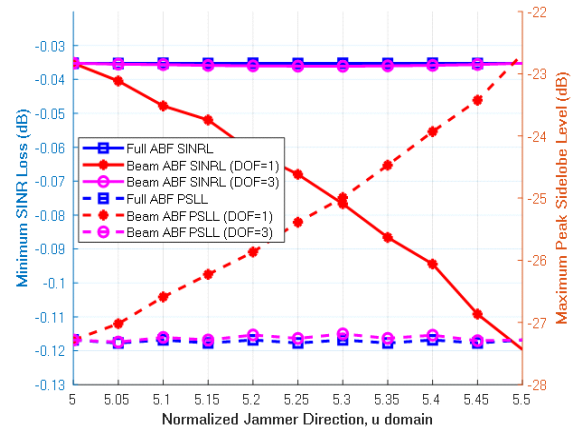


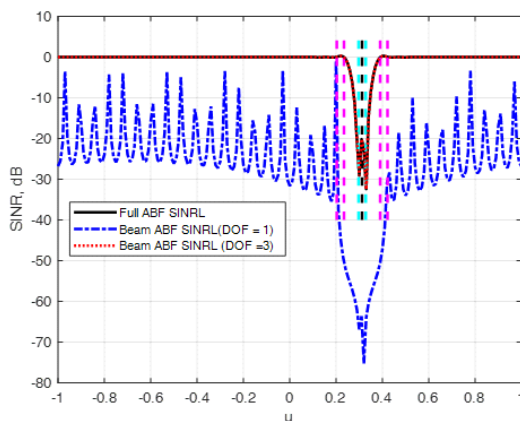
그림 7. 재머 각도 추정 오차에 따른 알고리즘 성능 분석  
Fig. 7. Performance analysis of the proposed method corresponding to the jammer angle estimation error.



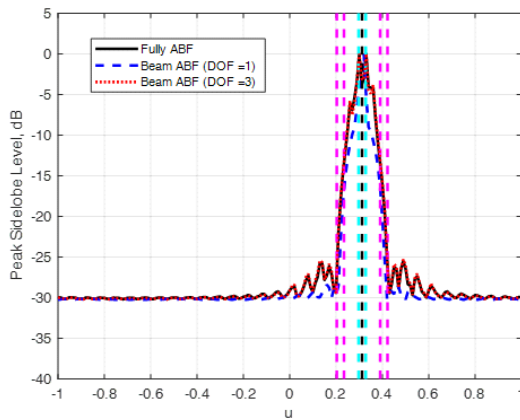
형성과 거의 동일한 성능을 얻을 수 있다.

#### 4.2 가까이 위치한 두 개의 재머 환경에서의 알고리즘 성능 분석

그림 8은 두 재머가 각도 측면에서 가까이 위치하여 FFT의 분해능 안에서 하나의 재머로 탐지되는 경우를 나타낸다. 두 재머의 위치는  $u$  도메인에서  $[0.2969, 0.3281]$



(a) 표적 각도에 따른 신호대간섭잡음비 손실  
(a) SINR loss according to target direction



(b) 표적 각도에 따른 최대 부엽 레벨  
(b) Maximum sidelobe level according to target direction

그림 8. 가까이 위치한 두 재머 환경에서의 표적 각도에 따른 신호대간섭잡음비 손실 및 최대 부엽 레벨  
Fig. 8. SINR loss and maximum sidelobe level according to target direction in the 2 closely spaced jammers environment.

로  $2/N$ 의 5배에 해당되는 위치를 기준으로 양쪽으로  $\pm 0.25 \times (2/N)$  만큼 떨어져 있고, 모두 재머대잡음비 50 dB이다. 그림의 하늘색 세로 점선은 재머의 위치를 나타내고, 검은색 세로 점선은 탐지된 각도, 즉 자유도가 할당된 빔 위치를 나타낸다. 이 때, 두 개의 재머에 대하여 1개의 자유도를 적용하게 되므로 재머 제거 성능이 떨어진다. 신호대간섭잡음비 손실 측면에서 제거되지 않고 남은 재머 성분의 영향으로 확연히 성능 열화가 나타난다. 반면에 최대 부엽 레벨에서는 완전 적응 빔 형성보다 좋은 성능을 보여주는데, 이는 완전 적응 빔 형성에서는 두 재머를 모두 제거하기 위해서 2개의 널을 생성하는 반면, 제안한 알고리즘에서는 하나의 널을 생성하기 때문이다. 이러한 경우, 성능 열화를 막기 위해 FFT를 통해 추정된 각도 좌우에  $\pm 1/N$ 에 해당되는 빔을 추가하여 탐지된 재머 당 3빔(3개의 자유도)을 할당하였다. 결과에서 알 수 있듯이, 자유도가 추가된 경우 신호대간섭잡음비 손실과 최대 부엽 측면에서 완전 적응 빔 형성과 거의 유사한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 완전 디지털 능동배열 레이더에 실시간 적용 가능한 적응 빔 형성 알고리즘을 제안하였다.

제안한 기법은 FFT를 통해 재머의 정보를 추정하고, 이를 기반으로 제한 조건과 재머의 방향에 해당되는 빔 도메인으로 신호를 국부화시킨다. 빔 도메인 국부화 기법은 최소의 자유도로 적응 빔 형성을 수행하므로 실시간 적용이 가능하다. 성능을 검증하기 위하여, 특정 시나리오 상에서의 완전 디지털 선배열에 대한 적응 빔 형성 알고리즘의 신호대간섭잡음비 손실과 최대 부엽 수준을 살펴 보았다. 제안한 알고리즘은 재머의 방향에 대한 정확도가 보장되면 완전 적응 빔 형성에 가까운 성능을 얻을 수 있다.

#### References

- [1] S. H. Talisa, K. W. O'haver, T. M. Comberiate, M. D. Sharp, and O. F. Somerlock, "Benefits of digital phased array radars," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 3, pp. 530-543, Mar. 2016.

- [2] M. C. Kang, J. Park, H. S. Jin, Y. Kang, E. Yang, and Y. H. Jang, "A comparison of adaptive beamforming algorithms applicable to multi-function radars," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 4, pp. 346-357, Apr. 2020.
- [3] X. Wang, E. Aboutanios, "Adaptive reduced dimensional beamspace beamformer design by analogue beam selection", in *2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brighton, May. 2019, pp. 4350-4354.
- [4] A. Hassanien, S. A. Vorobyov, "A robust adaptive dimension reduction technique with application to array processing," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 22-25, Jan. 2009.
- [5] M. Li, Y. Lu, "Dimension reduction for array processing with robust interference cancellation," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 103-112, Jan. 2006.
- [6] W. Y. Yang, M. K. Park, S. W. Hong, and C. H. Kim, "Analysis of adaptive side-lobe canceller algorithm for fully digital active array radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 5, pp. 375-382, May. 2018.
- [7] B. D. Van Veen, K. M. Buckley, "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," *IEEE ASSP Magazine*, vol. 5, pp. 4-24, Apr. 1988.
- [8] H. Wang, L. Cai, "On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 660-670, Jul. 1994.
- [9] I. Reed, J. Mallet, and L. Brennan, "Rapid convergence rate in adaptive arrays," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-10, no. 6, pp. 853-863, Nov. 1974.

양 은 정 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4724-5542>



2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)  
 2006년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 2011년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
 2011년 1월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리

장 윤 희 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3363-7158>



1999년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)  
 2002년 2월: 중앙대학교 영상공학과 (공학석사)  
 2002년 1월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원  
 [주 관심분야] 레이더 신호처리

김 우 성 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7139-5968>



시스템 등

2006년 2월: 충남대학교 전자전과정보통  
신공학부 (공학사)

2008년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공  
학석사)

2008년 2월~현재: 국방과학연구소 선임  
연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더

염 동 진 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9690-3201>



1991년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학  
사)

1993년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학  
석사)

1993년 3월~현재: 국방과학연구소 책임  
연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리