

배열 인자 LUT 기반 보간을 이용한 레이다 신호 모의 기법

Radar Signal Simulation Using Interpolation Based on Array Factor LUT

박인호 · 정대교*

In-Ho Park, Dae-Kyo Jeong*

요약

본 논문에서는 배열 인자를 사전 계산하여 저장한 LUT를 기반으로 보간을 적용함으로써 배열 인자를 근사하는 레이다 신호 모의 기법을 제안한다. 기존의 배열 인자 직접 계산 방식은 표적 수가 증가하거나 배열 규모가 커질수록 연산량이 크게 증가하여 실시간 신호 모의에 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 표적 방향과 빔 방향의 차이에 대응하는 배열 인자 값을 LUT로부터 호출하고, 보간을 통해 최종 배열 인자를 근사하여 신호 모의를 수행한다. 제안된 기법의 성능을 분석하기 위해 모노펄스 기반 각도 추정을 적용하였으며, 각도 추정 오차와 평균 계산 시간을 기준으로 기존 방식들과 비교하였다. 제안된 기법은 최근접 샘플 선택 방식 대비 각도 추정 오차가 감소하였고, 배열 인자 직접 계산 방식과 유사한 성능을 유지하면서도 계산 시간을 효과적으로 단축함을 확인하였다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 방식이 다표적 환경이나 대규모 배열 안테나 기반 레이다 시스템의 신호 모의에 효율적인 기법임을 확인하였다.

Abstract

This study proposes a radar-signal simulation method that approximates the array factor using interpolation based on a precomputed look-up table (LUT). Conventional array factor computations suffer from high complexity in multi-target and large-scale array environments. The proposed method efficiently approximates the array factor using LUT-based interpolation, and its performance is evaluated using monopulse angle estimation. Simulation results show that the proposed method achieves a lower angle estimation error than nearest-neighbor selection, while maintaining a performance comparable to that of array factor computation with reduced computation time.

Key words: Radar, Array Factor, Interpolation, Look-Up Table, Monopulse

I. 서론

현대 레이다는 표적의 탐지와 추적뿐 아니라 식별, 교전 지원, 상황인식 등 다양한 임무를 동시에 수행해야 하

는 환경에 직면하고 있으며, 이에 따라 단일 기능 중심의 시스템에서 벗어나 여러 임무를 동시에 수행하는 다기능 레이다(multi-function radar) 형태로 발전하고 있다^{[1][2]}. 특히 전장 환경이 복잡해짐에 따라 다수의 표적을 동시에

「이 논문은 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UC250013SD).」
한화시스템(Hanwha Systems)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received December 18, 2025 ; Revised January 2, 2026 ; Accepted January 15, 2026. (ID No. 20251218-154)

· Corresponding Author: Inho Park (e-mail: inho.park@hanwha.com)

처리해야 하는 레이다 운용의 중요성이 더욱 커지고 있다. 다기능 레이다의 성능을 검증하는 가장 확실한 방법은 실제 운용 시험에서 얻은 실데이터를 기반으로 한 평가이지만, 높은 비용과 안전 위험, 환경 제어의 어려움, 제한된 반복 시험 횟수 등의 제약으로 인해 전체 성능을 종합적으로 평가하기 어렵다. 따라서 실제 시험을 보완하거나 대체하기 위해, 레이다의 운용 과정을 다양한 표적 환경에서 재현할 수 있는 레이다 신호 모의 장비를 활용한 성능 검증이 필수적인 방법으로 자리 잡고 있다.

이에 따라, 레이다 입력 신호를 실제와 유사하게 만들어 알고리즘과 장비 성능을 미리 점검할 수 있는 레이다 신호 모의 장치에 대한 연구가 진행되고 있다^{[3]-[5]}. 참고문헌 [3]에서는 능동위상배열 다기능 레이다의 부배열(sub-array) 수신 신호를 모의하기 위한 신호 모의 장치를 설계하였으며, 참고문헌 [4]에서는 해상용 전장 환경을 모의할 수 있는 디지털 기반 실시간 레이다 신호 모의 장치를 제안하였다. 참고문헌 [5]에서는 합성개구레이다(synthetic aperture radar) 장비의 성능 분석을 위하여 레이다 표적모의장치를 설계하고 제작한 결과를 소개하였다.

위 연구들에서 제안한 신호 모의 장치는 표적의 위치, 속도, RCS(radar cross section) 등의 정보를 실시간으로 입력받아 표적마다 필요한 계산을 개별적으로 수행한다. 이 과정에서 표적 방향과 빔 조향 방향의 차이에 따른 빔 손실 및 신호 변화를 반영하기 위해 배열 인자(array factor)를 계산하여 사용한다. 배열 인자는 배열 안테나의 각 소자 위치와 위상, 크기 가중치를 고려해 특정 방향으로의 방사 특성을 합성한 복소 함수이기 때문에, 이를 직접 계산하여 모의하는 방식은 정확도가 높다는 장점이 있다. 그러나 기존 연구들은 표적마다 배열 인자를 매번 직접 계산하는 구조를 사용하고 있어, 표적 수가 많아지거나 배열 안테나 규모가 커질 경우 계산량이 급격히 증가하는 문제가 있다. 이로 인해 여러 표적을 동시에 모의해야 하는 다표적 환경이나, 대규모 배열 안테나 시스템에서는 실시간 신호 모의가 어려워지는 한계가 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 연산량을 줄이고 실시간성을 확보하기 위한 다양한 레이다 신호 모의 기법들이 제안되어 왔다^{[3],[6]}. 참고문헌 [3]에서는 빔 조향 방향 인근에 존재하는 표적만을 모의 대상으로 제한하는 인빔

(in-beam) 개념을 사용하여, 연산량을 줄이고 실시간성을 확보하고자 하였다. 이는 인빔 조건을 만족하는 표적에 대해서만 배열 인자 계산을 수행함으로써 리소스를 절감하는 방식이다. 참고문헌 [6]에서는 공간을 격자로 나누고, 각 슬라이스 대푯값만 계산하는 방식으로 전체 신호 처리 과정을 대체하여 모의 속도를 높이는 방식을 소개하였다. 이 방법은 전 과정 실시간 처리보다 훨씬 빠른 모의를 가능하게 하고, 오차는 상대적으로 작게 유지됨을 보였다.

그러나 앞서 소개한 연구들은 공통적으로 사용자가 관심을 가지는 특정 공간 구간 외의 영역에 대해서는 신호 모의를 수행하기 어렵다는 구조적인 제약을 가진다. 모의 대상이 빔 조향 방향 인근이나 사전에 정의된 공간 슬라이스로 제한되기 때문에, 사용자가 분석하고자 하는 임의의 공간 영역전반에 대한 신호 특성을 유연하게 반영하기 어렵다. 이로 인해, 실제 레이다 운용 환경에서 발생할 수 있는 다표적, 재머(jammer), 클러터(clutter) 신호를 포함한 종합적인 시스템 성능 분석에는 한계가 존재한다.

본 논문에서는 앞서 언급한 기존 레이다 신호 모의 기법들의 공간적 제약과 계산 복잡도 문제를 동시에 해결하기 위해, 배열 인자를 직접 계산하는 대신, 사전에 계산된 배열 인자 LUT(look-up table)를 기반으로 보간(interpolation)을 적용하여 배열 인자를 근사하는 레이다 신호 모의 방안을 제안한다. 제안된 방식은 배열 인자를 전 공간 영역에 대해 LUT 형태로 저장한 후, 표적 방향에 대응하는 배열 인자 값을 라그랑주 보간(Lagrangian interpolation)을 통해 근사함으로써 계산 정확도를 유지하면서도 연산량을 감소시킨다.

이를 통해 특정 공간 구간으로 모의 대상을 제한하지 않고, 사용자가 관심을 가지는 영역 전반에 대해 유연한 신호 모의가 가능하며, 다표적 환경이나 대규모 배열 안테나 시스템과 같이 배열 인자 계산 부담이 큰 조건에서도 실시간 모의에 적합한 구조를 제공한다. 또한 본 논문에서는 제안된 방식의 유효성을 검증하기 위해 모노펄스(monopulse) 각도 추정을 적용하여, 기존 방식과의 비교를 통해 각도 추정 성능과 계산 시간 측면에서의 특성을 분석하였다.

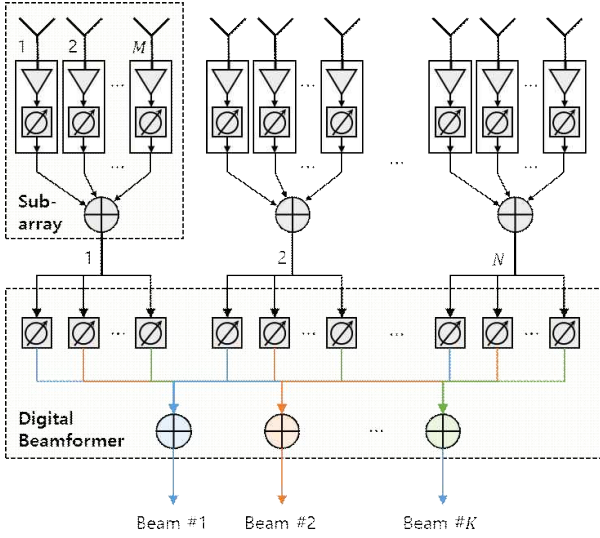


그림 1. 부배열 기반의 배열 안테나 구조
Fig. 1. Array antenna structure based on sub-array.

II. 배열 인자 LUT 기반 레이더 신호 모의 기법

2-1 시스템 구조

본 논문의 배열 안테나 구조는 그림 1과 같다. 부배열 기반의 배열 안테나이며, 해당 구조는 디지털 빔형성(digital beamforming)을 통해 다양한 빔 합성이 가능하기 때문에 다기능 레이더에 널리 적용되고 있다^{[7],[8]}. 설계된 배열 안테나는 총 N 개의 부배열로 구성되며, 각 부배열은 M 개의 단일 소자로 구성된다. 부배열은 각 안테나 소자에 인가된 신호에 진폭 및 위상 가중치를 적용하여 소자별 신호를 합성한다. 이후 각 부배열 출력 신호에 디지털 빔포밍 가중치를 적용하여 K 개의 다중 수신 빔을 형성한다. 송신 빔은 각 안테나 소자의 방사 신호에 진폭 및 위상 가중치만 적용하여 단일 빔을 형성한다.

2-2 수신 신호 및 배열 인자 모델

k -번째 수신 빔에 의한 복소 신호(s_k)는 레이더 방정식(radar equation)을 기반으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다^[9].

$$s_k(u, v) = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4 B_n T_s L}} \times AF^{tx}(u, v) \times AF_k^{rx}(u, v) \quad (1)$$

식 (1)에서 P_t 는 안테나 송신 전력, G_t 는 안테나 bore-sight 방향에서의 송신 안테나 이득, G_r 는 안테나 bore-sight 방향에서의 수신 안테나 이득, λ 는 파장(wavelength), σ 는 RCS, r 은 레이더부터 표적까지의 거리, B_n 은 잡음 대역폭, T_s 은 시스템 온도, L 은 손실이다. $AF^{tx}(u, v)$ 는 송신 빔의 배열 인자, $AF_k^{rx}(u, v)$ 는 k -번째 수신 빔의 배열 인자를 나타낸다. 배열 인자는 앞서 기술한 바와 같이 배열 안테나 각 소자에 인가된 크기와 위상에 의해 형성되는 복소 함수로, 송·수신 빔 방향과 표적 방향에 따라 결정되는 빔 패턴의 형태를 뜻한다. (u, v)는 표적 방향을 뜻하며 아래 식 (2)와 같다^[3].

$$u = \sin(az)\cos(el), v = \sin(el) \quad (2)$$

위 식에서 az 는 표적의 방위각(azimuth), el 은 표적의 고각(elevation)이다. 송신 빔의 배열 인자 $AF^{tx}(u, v)$ 는 모든 배열 안테나 소자 신호를 합성하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$AF^{tx}(u, v) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} \times e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda} \{x_{n,m}(u-u_0) + y_{n,m}(v-v_0)\} \right]} \quad (3)$$

위 식에서 $a_{n,m}$ 은 n -번째 부배열의 m -번째 안테나 소자의 진폭 가중치, $(x_{n,m}, y_{n,m})$ 는 n -번째 부배열의 m -번째 안테나 소자의 위치, (u_0, v_0) 는 송신 빔 조향 방향이다.

수신 빔 배열 인자는 부배열 단위의 배열 인자부터 정의한다. n -번째 부배열에 해당하는 배열 인자 $AF_n^{sub}(u, v)$ 를 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$AF_n^{sub}(u, v) = \sum_{m=1}^M g_{n,m} \times e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda} \{x_{n,m}(u-u_0) + y_{n,m}(v-v_0)\} \right]} \quad (4)$$

위 식에서 $g_{n,m}$ 은 n -번째 부배열의 m -번째 안테나 소자의 진폭 가중치이다. 위 식으로 형성된 부배열의 배열 인자에 디지털 빔포밍 가중치($w_{n,k}$)를 적용하여 k -번째 수신 빔의 배열 인자 $AF_k^{rx}(u, v)$ 를 표현할 수 있다.

$$AF_k^{rx}(u, v) = \sum_{n=1}^N w_{n,k}^* AF_n^{sub}(u, v) \quad (5)$$

식 (5)에서 $w_{n,k}$ 는 n -번째 부배열의 k -번째 수신 빔에 대한 디지털 빔포밍 가중치, *는 켈레 복소수(complex conjugate)이다.

$$w_{n,k} = \exp \left[j \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} (X_n u_k^{squint} + Y_n v_k^{squint}) \right\} \right] \quad (6)$$

위 식에서 (X_n, Y_n) 은 n -번째 부배열의 위상 중심(phase center), $(u_k^{squint}, v_k^{squint})$ 는 k -번째 수신 빔 조향 방향으로, 송신 빔 조향 방향 (u_0, v_0) 을 기준으로 한 상대 방향(각도 편차)이다. 따라서 표적 방향과 송·수신 빔 조향 방향이 주어지면 송·수신 배열 인자가 결정되며, 결정된 배열 인자를 통해 복소 신호 s_k 가 산출된다.

2.3 배열 인자의 LUT 기반 처리 방식

본 논문에서 제안하는 신호 모의 방식은 식 (3)과 (5)를 통해 계산된 배열 인자를 LUT로 저장하여 복소 신호를 계산하는 방식을 기반으로 한다. 배열 인자의 입력인 (u, v) 를 전체 각도 범위 내에서 동일한 간격으로 샘플링하여 2차원 그리드를 구성한다.

$$\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_P\}, \mathbf{v} = \{v_1, v_2, \dots, v_Q\} \quad (7)$$

위 식에서 P 는 u -방향의 샘플 수, Q 는 v -방향의 샘플 수이다. 각 샘플 위치에서 배열 인자를 계산하여 복소 값을 저장하며, LUT는 $P \times Q$ 크기의 복소 배열로 정의된다. 이때 P 와 Q 는 LUT의 해상도를 결정하는 주요 설계 변수이다. P 와 Q 를 크게 설정하여 LUT 해상도를 증가시키면 배열 인자의 각도 변화 특성을 보다 정밀하게 표현할 수 있으나, 이에 따라 메모리 요구량과 사전 계산 비용이 증가한다. 반대로 P 와 Q 를 작은 값으로 설정하여 LUT 해상도가 낮아질 경우 계산 효율은 향상되지만, 배열 인자의 국소적인 변화 특성이 충분히 반영되지 않아 각도 추정 성능 저하로 이어질 수 있다. 특히 추적 레이다에서 일반적으로 사용되는 모노펄스 기반 각도 추정에서는 빔 중심 인근에서 배열 인자의 기울기가 각도 민감도를 결정하므로, LUT 해상도는 이러한 국소적인 변화 특성을 충분히 표현할 수 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 P 와 Q 를 고정된 값으로 제한하지 않고 설계 변수로

설정하여, LUT 해상도에 따른 각도 추정 성능과 계산 시간의 변화를 모의시험을 통해 분석하였다.

또한 LUT는 배열 인자의 송신 빔 방향 (u_0, v_0) 이 원점을 일때를 기준으로 생성하였다. LUT를 호출할 때에는 송신 빔의 조향 각도와 표적의 실제 방향 간 차이를 산출하고, 이 상대각에 해당하는 LUT 인덱스를 사용하여 값을 참조하기 때문이다. 즉, LUT는 절대 각도가 아닌 상대 각도를 입력으로 활용하도록 설계되었다. 송신 빔 배열 인자는 1개의 LUT, 수신 빔 배열 인자는 K 개의 LUT가 저장되며, 저장되는 LUT는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} L^{tx}[i, j] &= AF^{tx}(\mathbf{u}[i], \mathbf{v}[j]), \\ L_k^{rx}[i, j] &= AF_k^{rx}(\mathbf{u}[i], \mathbf{v}[j]) \end{aligned} \quad (8)$$

위 식에서 $L^{tx}[i, j]$ 는 송신 빔 배열 인자 기반 LUT에서 (i, j) 위치에 저장된 샘플 값, $L_k^{rx}[i, j]$ 는 k -번째 수신 빔 배열 인자 기반 LUT에서 (i, j) 위치에 저장된 샘플 값이다. 송신 빔 조향 방향과 표적 방향의 상대각에 해당하는 LUT 인덱스는 다음 식 (9)로 산출된다.

$$\begin{aligned} k_u &= \underset{i}{\operatorname{argmin}} |u[i] - \Delta u|, \\ k_v &= \underset{j}{\operatorname{argmin}} |v[j] - \Delta v| \end{aligned} \quad (9)$$

위 식에서 k_u 는 u -방향 LUT 인덱스, k_v 는 v -방향 LUT 인덱스이다. $(\Delta u, \Delta v)$ 는 표적 방향과 송신 빔 조향 방향의 차이 $(\Delta u = u - u_0, \Delta v = v - v_0)$ 이다. 만약 보간을 수행하지 않는다면, (k_u, k_v) 번째 샘플에 해당하는 송·수신 배열 인자의 LUT 값을 호출하여 복소 신호 s_k 를 계산할 수 있다.

2.4 라그랑주 보간 기반 배열 인자 근사

제안된 기법은 2차원 도메인 (u, v) 상의 LUT 값을 기반으로 정확한 배열 인자 값을 근사하기 위해 2차원 라그랑주 보간 방식을 적용한다. 배열 인자는 관측 각도에 대해 연속적이고 완만하게 변화하는 복소 함수이다^[10]. 이러한 특성으로 인해 배열 인자는 각도 도메인에서 샘플링한 후, 보간을 통해 근사할 수 있다. 일반적으로 연속적이고 완만하게 변화하는 함수의 근사에는 다항 보간

(polynomial interpolation) 기법이 널리 사용되며, 라그랑주 보간은 기저 함수(basis function)를 통해 보간 다항식을 구성할 수 있는 대표적인 방법이다^[11]. 따라서 본 논문에서는 배열 인자가 저장된 LUT를 기반으로, 라그랑주 보간을 이용하여 배열 인자를 효과적으로 근사하는 방식을 제안한다. 이 방식은 u -방향과 v -방향의 라그랑주 기저 함수를 곱 형태로 결합하여 이중합 구조의 2차원 보간식을 구성한다.

라그랑주 보간에 필요한 수식을 전개하기 위해 변수를 정의하였다. T 는 보간 차수(order)로, 보간에 사용되는 샘플 수는 $(T+1)$ 개이다. 라그랑주 보간의 차수는 배열 인자 근사의 정확도와 계산 복잡도에 직접적인 영향을 미치는 주요 설계 변수이다. 일반적으로 보간 차수가 증가할수록 배열 인자의 근사 오차는 감소하는 반면, 보간에 필요한 연산량은 증가한다. 그러나 배열 인자는 관측 각도에 대해 연속적인 특성을 가지므로, 일정 차수 이상의 보간에서는 정확도 향상이 제한적일 수 있다. 이에 따라 본 논문에서는 보간 차수를 고정된 값으로 제한하지 않고 설계 변수로 설정하여, 차수 변화에 따른 각도 추정 성능과 계산 시간의 변화를 모의시험을 통해 분석하였다. 일반적으로 보간 차수는 중심 샘플 기준으로 대칭적인 샘플을 선택하기 위해 짝수 차수를 사용한다. h 는 중심으로부터 앞뒤 샘플을 정의하기 위한 변수로 $h=T/2$ 로 정의한다. c 는 인덱스 오프셋 집합으로 $c=\{-h, \dots, 0, \dots, h\}$ 이다. 보간에 필요한 중심 인덱스 (k_u, k_v) 는 식 (9)과 동일하다. 라그랑주 보간은 중심 샘플을 기준으로 좌우 각각 h 개의 이웃 샘플을 요구하므로, 인덱스의 양끝 경계 조건을 만족시키기 위해 중심 인덱스 (k_u, k_v) 는 식 (10)의 조건을 따르도록 제한하였다.

$$\begin{aligned} 1+h &\leq k_u \leq P-h, \\ 1+h &\leq k_v \leq Q-h \end{aligned} \quad (10)$$

위 식은 LUT 양단부에서 보간 시 샘플 부족이 발생하지 않도록 하기 위한 전처리 단계이다. 인덱스가 위 식의 범위를 벗어나는 경우 해당 값을 가장 가까운 경계점으로 고정하여 처리한다. 다음으로 표적 방향과 빔 방향의 차이 $(\Delta u, \Delta v)$ 와 중심 인덱스에 해당하는 방향 $(u[k_u], v[k_v])$ 간의 정규

화된 거리 (x_u, x_v) 를 정의한다.

$$x_u = \frac{\Delta u - u[k_u]}{d_u}, \quad x_v = \frac{\Delta v - v[k_v]}{d_v} \quad (11)$$

위 식에서 (d_u, d_v) 는 LUT 샘플 간 간격이다. 앞서 기술된 수식들을 기반으로 라그랑주 보간의 기저 함수를 정의한다. t -번째 보간 인덱스의 기저 함수는 식 (12)와 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} B_u^t(x_u) &= \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq t}}^{T+1} \frac{x_u - c[l]}{c[t] - c[l]}, \\ B_v^t(x_v) &= \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq t}}^{T+1} \frac{x_v - c[l]}{c[t] - c[l]} \end{aligned} \quad (12)$$

위 식에서 $B_u^t(x_u)$ 와 $B_v^t(x_v)$ 는 LUT상의 t -번째 샘플에 대응하는 기저 함수이다. 이는 해당 샘플이 보간 결과에 기여하는 가중치를 결정하는 함수이다. 정의된 기저 함수를 기반으로 최종 근사값 $\widehat{AF}(\Delta u, \Delta v)$ 은 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \widehat{AF}(\Delta u, \Delta v) &= \sum_{t_u=1}^{T+1} \sum_{t_v=1}^{T+1} B_u^{t_u}(x_u) B_v^{t_v}(x_v) \\ &\quad \times L[k_u + c[t_u], k_v + c[t_v]] \end{aligned} \quad (13)$$

위 식에서 $L[\cdot]$ 는 배열 인자를 기반으로 저장된 LUT이며, 송신 빔 LUT는 $L^{tx}[\cdot]$, 수신 빔 LUT는 $L_k^{rx}[\cdot]$ 를 사용한다. 식 (13)에서 $\widehat{AF}(\Delta u, \Delta v)$ 의 입력을 $(\Delta u, \Delta v)$ 로 설정한 것은, (x_u, x_v) 와 (k_u, k_v) 가 독립 변수 $(\Delta u, \Delta v)$ 에 의해 결정되는 종속 변수이기 때문이다.

제안된 기법을 통해 식 (1)의 복소 신호 모델에서 배열 인자에 해당하는 항을 식 (13)에 정의된 라그랑주 보간 기반 배열 인자 근사값으로 계산함으로써 최종 복소 신호 s_k 를 도출할 수 있다.

제안된 기법은 LUT 기반의 배열 인자 호출 방식을 기반으로 사전 계산된 배열 인자를 저장하여 사용하므로, LUT 해상도에 따라 메모리 요구량과 사전 계산 비용이 결정된다. LUT는 앞서 기술한 샘플 수인 P 와 Q 로 정의되는 $P \times Q$ 크기의 복소 배열로 구성되며, 이에 따른 메모리 요구량은 PQ 에 비례한다. 또한 LUT 생성 과정에

서 각 샘플 지점에 대해 배열 인자를 계산하므로, 사전 계산 비용은 배열 인자 계산에 필요한 연산량을 C_{AF} 이라 할 때, PQC_{AF} 에 비례한다. 해당 사전 계산은 모의 이전 단계에서 오프라인으로 한 번 수행되므로, 실시간 신호 모의 과정에는 직접적인 영향을 미치지 않는다.

III. 모의시험 및 성능 분석

3-1 모의 조건

모의시험을 위해 설계된 배열 안테나 파라미터를 표 1에 정리하였고, 배열 안테나 형상을 그림 2에 도시하였다. 주파수는 10 GHz이고, 총 10,000개의 안테나 소자로 구성된 100×100의 사각 배열 안테나이며, 안테나 소자 간 간

표 1. 배열 안테나 파라미터
Table 1. Array antenna parameters.

Parameter	Value
Frequency	10 GHz
Number of antenna elements	10,000 (100×100)
Number of sub-arrays	400 (5×5)
Antenna element spacing	0.5 λ
Transmit/receive amplitude weighting	Uniform

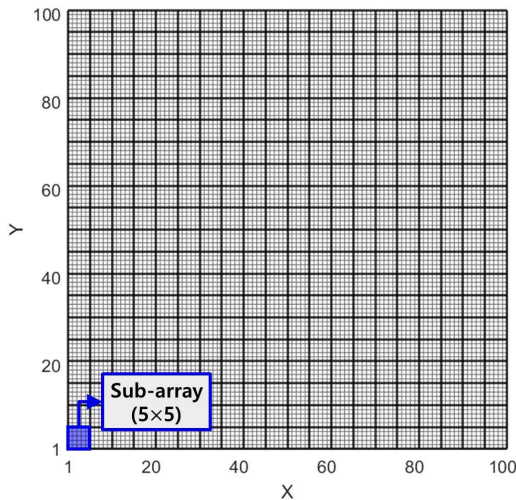


그림 2. 배열 안테나 형상
Fig. 2. Array antenna configuration.

격은 0.5 λ로 구성하였다. 한 개의 부배열은 5×5의 안테나 소자로 구성되어, 총 부배열 개수는 400개이다.

본 논문에서는 모의 방식에 따라 레이더 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 모노펄스 기법을 적용하여 표적 각도를 추정하였다. 모노펄스 각도 추정은 송·수신 배열 안테나에서 형성되는 합채널(Σ)과 차채널(Δ)의 패턴 특성을 이용하여 표적의 각도 오차를 계산하는 방식이다^[12].

모노펄스 빔 형성을 위해 그림 3과 같은 5개의 수신 빔을 구성하였다. 수신 빔폭은 방위각×고각에 대해 1°×1°, 수신 빔 간의 간격은 방위각×고각에 대해 0.5°×0.5°로 설정하였다. 각 수신 빔의 조향 방향은 1번 빔부터 5번 빔까지 각각 (-0.5°, 0°), (0°, -0.5°), (0°, 0°), (0°, 0.5°), (0.5°, 0°)이다. 송신 빔 방향은 (0°, 0°)으로 고정하였다.

모노펄스 기법을 구현하기 위해, 합채널은 3번 빔의 수신 신호로 구성하였다. u -방향 차채널은 5번 빔과 1번 빔의 신호 차이로, v -방향 차채널은 4번 빔과 2번 빔 신호의 차이로 각각 생성하였다. 모노펄스 빔 패턴은 그림 4와 같으며, 배열 안테나 구조가 방위각-고각 축에 대해 대칭이므로, v -방향의 차채널 빔 패턴은 u -방향의 차채널 빔 패턴과 동일한 형태를 갖는다. 따라서 그림 4에는 u -방향의 차채널 빔 패턴만 제시하고 v -방향의 차채널 빔 패턴은 생략하였다.

모의를 위한 표적 방향은 방위각과 고각 각각 [-0.5°,

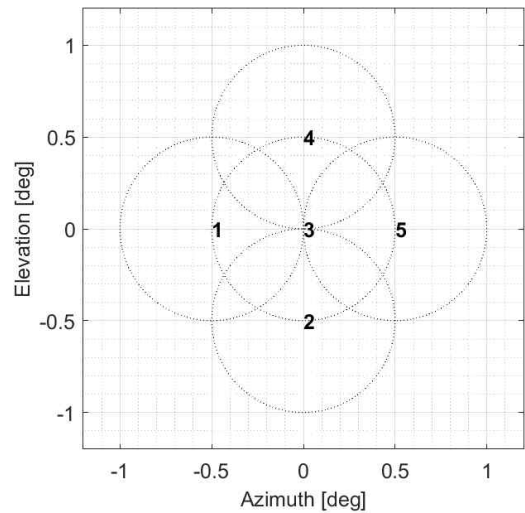


그림 3. 3-dB 수신 빔 형상
Fig. 3. 3-dB receive beam configuration.

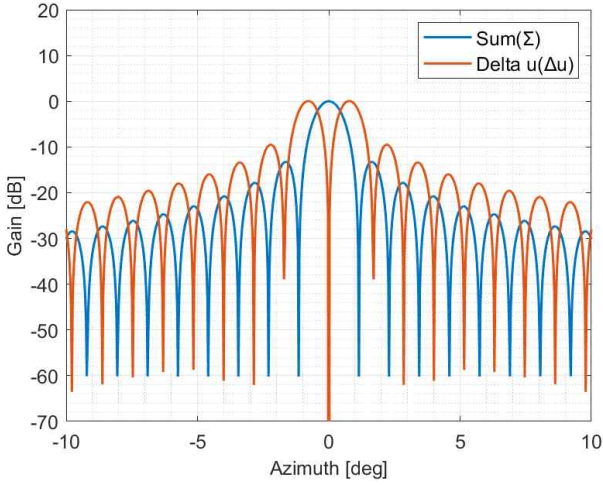


그림 4. 모노펄스 빔 패턴(u-방향)
Fig. 4. Monopulse beam pattern (u-axis).

0.5° 범위 내에서 균일 분포로 랜덤 생성하였다. 총 1,000회 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하여 각도 추정 성능을 평가하였다.

배열 인자 LUT의 (u, v) 범위는 전방향에 대한 배열 인자를 저장하기 위해 $[-1, 1]$ 로 설정하였으며, LUT의 샘플 개수(P, Q)와 보간 차수(T)는 변수로 두어 모의를 수행하였다.

본 연구에서는 배열 인자 계산 절차를 세 가지 방식으로 구분하여 비교하였다. 배열 인자 직접 계산 방식, 최근접 샘플 선택 방식, 그리고 제안된 방식이다. 배열 인자 직접 계산 방식은 복소 신호를 계산하기 위한 배열 인자를 수식을 통해 직접 계산하는 방식이다. 최근접 샘플 선택 방식은 LUT에서 보간 없이 가장 가까운 샘플만을 선택하여 배열 인자 값을 호출하고 복소 신호를 계산하는 방식이다.

성능 평가는 추정 방향과 실제 표적 방향의 차이로 정의되는 각도 추정 오차와 평균 계산 시간을 기준으로 비교하였다. 모의시험은 Intel Core Ultra 7 155H(1.4 GHz)와 64 GB RAM이 장착된 PC에서 수행하였다.

3-2 LUT 샘플 개수에 따른 모의 결과

LUT 샘플 개수에 따라 각 계산 방식에서의 각도 추정 오차와 평균 계산 시간을 분석하였다. 각도 추정 오차는

2차원 도메인 (u, v) 에서 실제 표적 방향과 추정 방향 간의 거리로 정의하였다.

$$\epsilon_{uv} = \sqrt{(u_{est} - u_{true})^2 + (v_{est} - v_{true})^2} \quad (14)$$

위 식에서 (u_{est}, v_{est}) 는 각도 추정 결과, (u_{true}, v_{true}) 는 실제 표적의 각도이다.

모의시험의 편의를 위해 u -방향의 샘플 개수 P 와 v -방향의 샘플 개수 Q 를 동일한 값으로 변경하며 모의하였다. 또한 샘플 수는 홀수로 선택하여 중앙점이 원점에 정렬되도록 하였다. 보간 차수는 2차로 고정하여 수행하였다. 아울러 배열 인자 계산 방식에 따른 성능 차이만을 비교하기 위해, 표적 신호의 크기는 30 dB로 고정하고 배열 인자를 제외한 다른 변수들로 인한 영향은 배제하였다.

샘플 개수에 따른 각도 추정 오차(ϵ_{uv})의 표준편차를 그림 5에 도시하였다. 이는 1,000회 Monte Carlo 시뮬레이션에서 얻어진 식 (14)의 각도 추정 오차(ϵ_{uv})의 분포로부터 계산된 값이다. 추정된 각도가 실제 각도와 가까울수록 오차가 0에 수렴하게 되며, 이에 따라 표준편차가 작아진다. 따라서 표준편차가 작을수록 각도 추정 성능이 우수함을 의미한다.

배열 인자 직접 계산 방식의 경우 식 (3) 및 식 (5)를 통해 배열 인자를 계산하므로 LUT 해상도와 무관하게 일

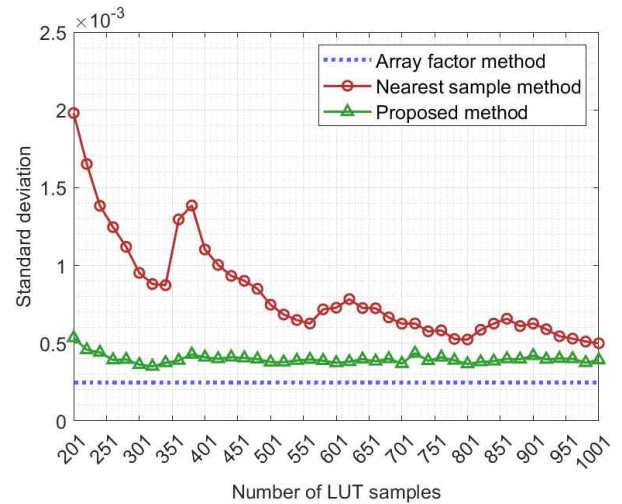


그림 5. 샘플 수에 따른 표준편차
Fig. 5. Standard deviation versus number of samples.

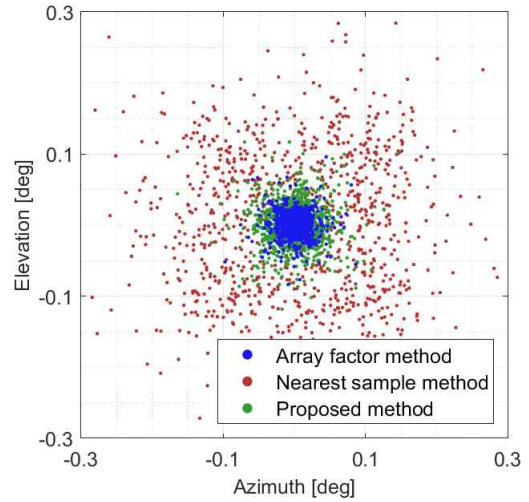
정한 성능을 보이며, 각도 추정 오차의 표준편차는 평균 약 2.48×10^{-4} 수준으로 나타났다.

최근접 샘플 선택 방식은 샘플 수가 증가함에 따라 표준편차가 감소하는 경향을 보였지만, 선형적으로 감소하지는 않았다. 이는 모노펄스 각도 추정을 위한 모노펄스 비율의 비선형성이 크기 때문에, LUT를 균일 간격으로 샘플링하더라도 실제 기울기 변화를 충분히 반영하지 못하기 때문이다. 특히 최근접 방식으로 LUT 값을 선택하는 경우, 목표값과 가장 가까운 샘플이 모노펄스 기울기를 평가하는 유효 구간을 벗어나면 실제 기울기와 차이가 커지며, 그 결과 샘플 수가 증가함에도 특정 구간에서 각도 추정 오차가 다시 증가하는 현상이 발생한다^[12]. 이는 비선형 함수에서 샘플 간격의 미세한 변화가 대표 샘플 위치를 바꾸어, LUT 기반 근사 성능에 불연속적인 변화를 일으키기 때문이다.

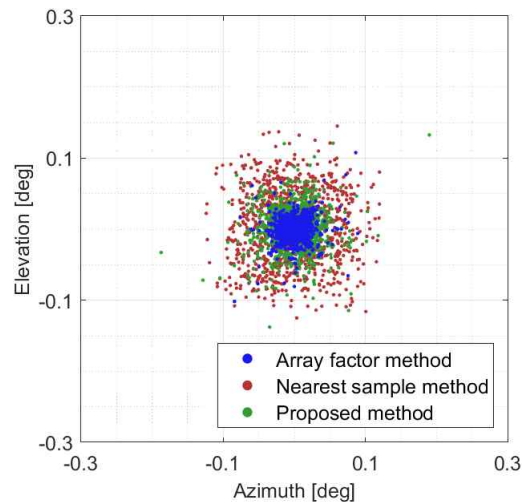
이에 비해 제안된 방식은 평균적으로 3.90×10^{-4} 의 표준편차를 보여, 최근접 샘플 선택 방식보다 현저히 낮은 오차 수준을 나타냈다. 또한 배열 인자 직접 계산 방식과의 차이도 평균적으로 1.42×10^{-4} 에 불과하여, 제안된 방식이 배열 인자 직접 계산 방식과 거의 동일한 정확도를 제공함을 확인할 수 있었다.

각도 추정 오차를 2차원 도메인(방위각, 고각)에서 확인하였다. 그림 6에 샘플 수가 401개인 경우와 801개인 경우의 각도 추정 오차를 도시하였다. 샘플 수가 401개인 경우 각도 추정 오차의 표준편차는 최근접 샘플 선택 방식과 제안된 방식이 각각 1.10×10^{-4} , 0.41×10^{-4} , 샘플 수가 801개인 경우 각도 추정 오차의 표준편차는 최근접 샘플 선택 방식과 제안된 방식이 각각 0.52×10^{-4} , 0.37×10^{-4} 으로 계산되었다.

샘플 개수에 따른 평균 계산 시간을 그림 7에 도시하였다. 배열 인자 직접 방식의 평균 계산 시간은 19.68 ms로 가장 오래 소요되었다. 이에 비해 최근접 샘플 선택 방식은 평균 약 0.09 ms로 가장 빠른 계산 시간을 보였으며, 제안된 방식은 평균 약 0.11 ms가 소요되어 최근접 샘플 선택 방식보다는 다소 느리지만 배열 인자 직접 계산 방식보다는 빠른 것으로 나타났다. 또한 샘플 수가 증가하더라도 평균 계산 시간에는 큰 변화가 없었는데, 이는 저장된 LUT 값을 단순히 호출하는 구조이기 때문이다.



(a) 샘플 수: 401개
(a) Number of samples: 401



(b) 샘플 수: 801개
(b) Number of samples: 801

그림 6. 샘플 수에 따른 각도 추정 오차
Fig. 6. Angle estimation error versus number of samples.

3-3 라그랑주 보간 차수에 따른 모의 결과

라그랑주 보간 차수가 각도 추정 성능과 계산 시간에 미치는 영향을 파악하기 위해 차수를 변경하며 모의시험을 수행하였다. 샘플 수는 301개로 고정하여 수행하였다. 앞선 시험과 마찬가지로 배열 인자 방식에 따른 차이만을 비교하기 위해 표적 신호의 크기는 30 dB로 고정하여, 배열 인자를 제외한 다른 변수들로 인해 성능이 영향을

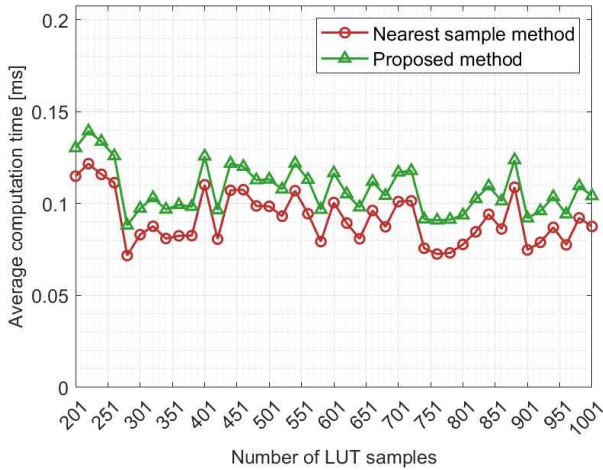


그림 7. 샘플 수에 따른 평균 계산 시간
Fig. 7. Average calculation time versus number of samples.

받지 않도록 설정하였다.

라그랑주 보간 차수에 따른 각도 추정 오차의 표준편차를 그림 8에 도시하였다. 차수가 증가할수록 각도 추정 오차의 표준편차에 큰 차이가 없는 것을 알 수 있으며, 저-차수(low-order)의 보간만으로도 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

그림 9은 라그랑주 보간의 차수에 따른 평균 계산 시간을 나타낸 것이다. 제안된 방식의 평균 계산 시간은 배열

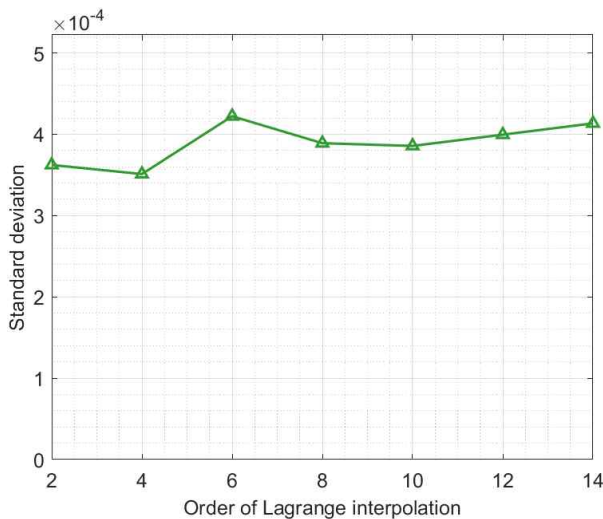


그림 8. 보간 차수에 따른 표준편차
Fig. 8. Standard deviation versus interpolation order.

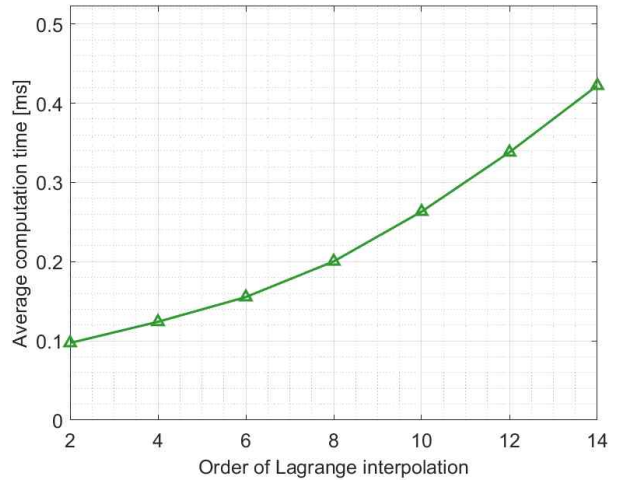


그림 9. 차수에 따른 평균 계산 시간
Fig. 9. Average calculation time versus number of samples.

인자 직접 계산 방식의 평균 계산 시간(19.68 ms)에 비해 현저히 작았다. 또한 보간 과정에서는 식 (13)과 같이 차수의 제곱에 비례하여 LUT에서 불러온 배열 인자 값이 가중합해야 하므로, 차수가 증가할수록 연산량이 완만하게 증가하는 추세를 보였다.

3-4 SNR에 따른 모의 결과

모의 환경의 다양성을 보다 효과적으로 검증하기 위해, 신호 품질 변화가 배열 인자 근사 정확도에 미치는 영향을 분석하고자 SNR 조건을 변화시키며 각도 추정 성능을 비교하였다. 샘플 수는 1,001개로 고정하고, 보간 차수는 2차로 설정하여 SNR만 변경하며 기준과 동일한 조건에서 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. SNR은 20 dB에서 50 dB까지 변경하며 모의시험을 수행하였다.

그림 10은 SNR에 따른 각도 추정 오차의 표준편차를 나타낸 것이다. 모든 SNR 구간에서 배열 인자 직접 계산 방식, 제안된 방식, 최근접 샘플 선택 방식 순으로 표준편차가 큰 것을 확인하였다. 이러한 결과는 제안된 보간 기반 방식이 특정 SNR 조건에 국한되지 않고, 다양한 신호 품질 환경에서도 안정적으로 배열 인자를 근사할 수 있음을 보여준다. 방식 간 성능의 정량적인 차이는 SNR 구간에 따라 다르게 나타났다. 20 dB의 SNR이 낮은 환경에서는 세 가지 방식 모두 잡음의 영향이 지배적으로 작용하여, 제안된 보

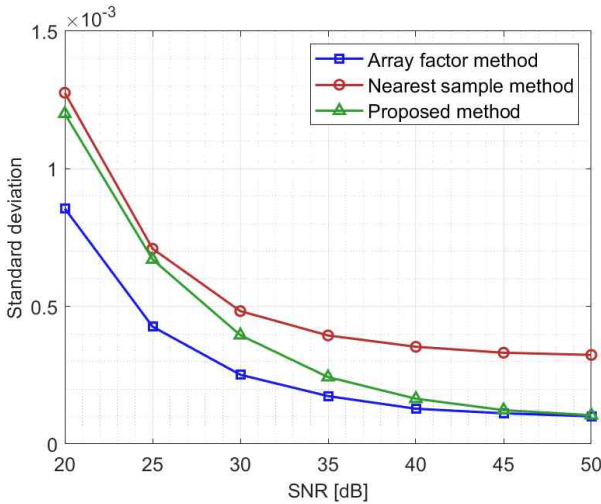


그림 10. SNR에 따른 표준편차
Fig. 10. Standard deviation versus SNR.

간 방식과 LUT 기반 최근접 샘플 선택 방식 간의 성능 차이가 상대적으로 작았다. 반면 50 dB의 SNR이 높은 환경에서는 제안된 보간 방식이 배열 인자 직접 계산 방식과 거의 동일한 성능을 보였으며, 최근접 샘플 선택 방식과는 뚜렷한 성능 차이를 보였다. 이는 제안된 방식이 고품질의 신호 환경에서 배열 인자의 연속적인 특성을 효과적으로 복원할 수 있음을 의미하며, 잡음 환경이 개선될수록 제안 기법의 장점이 더욱 명확해짐을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 라그랑주 보간을 이용한 LUT 기반 레이다 신호 모의 방안을 제안하였다. 제안된 방식은 레이다 신호 모의에 필요한 배열 인자를 사전에 LUT 형태로 저장하고, 신호 생성 시 표적 방향과 빔 방향의 차이에 대응하는 주변 배열 인자 값을 호출한 뒤 라그랑주 보간을 적용하여 최종 배열 인자를 근사하는 구조를 갖는다.

성능 분석을 위해 몬테카를로 각도 추정 시나리오에서 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 모의 결과, 제안된 방식은 최근접 샘플 선택 방식보다 작은 각도 추정 오차의 표준편차를 보였으며, 정확도 측면에서 직접 배열 인자를 계산하는 방식과 유사한 성능을 확인하였다. 계산 시간은 최근접 샘플 선택 방식보다는 증가하였지만, 배열 인자 직

접 계산 방식보다는 감소하였다. 또한 보간 차수가 증가함에 따라 평균 계산 시간은 증가하는 경향을 보였으나, 각도 추정 오차의 표준편차는 큰 차이를 보이지 않아 저-차수 보간만으로도 충분한 성능을 제공할 수 있음을 확인하였다. 추가적으로 모의 환경의 다양성을 고려하여 SNR 조건을 변화시키며 성능을 분석한 결과, SNR이 낮은 환경에서는 잡음의 영향으로 방식 간 성능 차이가 제한적이었으나, SNR이 높은 환경에서는 제안된 방식이 배열 인자 직접 계산 방식과 거의 동일한 각도 추정 성능을 보였다.

모의 결과를 종합하면, 제안된 기법은 배열 인자를 직접 계산하는 기존 방식에 비해 신호 모의에 소요되는 계산 시간을 크게 감소시키면서도 각도 추정 정확도를 효과적으로 유지할 수 있음을 보였다. 이를 통해 다수의 표적을 실시간으로 모의해야 하는 환경이나, 배열 인자 계산 비용이 큰 대규모 배열 안테나 기반 레이다 시스템에서 제안된 기법이 효과적인 신호 모의 방안이 될 수 있음을 확인하였다. 또한 제안된 기법은 배열 인자 LUT를 전 방향에 대해 사전 생성하는 경우, 표적 방향에 제한 없이 신호 모의가 가능하다는 장점을 가진다. 따라서 표적뿐만 아니라 재머, 클러터 등 다양한 신호 요소를 포함한 복잡한 모의 환경을 고려해야 하는 다기능 레이다의 신호 모의 장치에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만 제안된 기법은 배열 인자가 표적 방향에 대해 연속적이고 완만하게 변화한다는 특성을 기반으로 하여 LUT 및 보간을 적용한 방식으로, 배열 인자의 급격한 변화가 발생하는 조건이나 높은 각도 해상도가 요구되는 환경에서는 LUT 해상도 및 보간 차수에 따른 성능 저하 가능성이 있다. 또한 LUT를 전 방향에 대해 사전 생성하는 구조이므로, 배열 규모가 매우 큰 경우 메모리 요구량과 사전 계산 비용이 증가할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 제안된 기법의 성능은 LUT 해상도와 보간 차수 설정에 영향을 받으며, 적용 환경에 따라 적절한 설계 파라미터 선택이 필요할 것으로 보인다.

References

[1] M. H. Park, J. Y. Go, H. S. Kim, W. J. Jeon, S. W. Kwon, and K. W. Lee, "Resource management method of multi-

- function radar for simultaneous tracking of ballistic missiles in combined tactics," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 5, pp. 484-493, May 2021.
- [2] S. H. Hwang, H. S. Kim, J. H. Lim, J. M. Joo, K. W. Lee, and M. S. Kwon, et al., "Design of real-time digital multi-beamformer of digital array antenna system for MFR," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 151-159, Apr. 2022.
- [3] G. Kim, K. Yoo, K. Lee, S. Gil, E. Yang, and K. Lee, et al., "Development of radar environmental signals simulator for simulating sub-array receiving signals of active phased array multi-function radar," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 23, no. 5, pp. 452-458, Oct. 2020.
- [4] S. H. Lee, M. K. Park, B. S. Kang, B. S. Shin, D. M. Park, and S. I. Choi, et al., "System design and real-time implementation of simulated signal generator for naval full-digital multi-functional radar training," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 2, pp. 104-113, Feb. 2024.
- [5] S. K. Kweon, H. Y. Yeo, S. M. Park, J. H. Han, C. S. Jung, and K. W. Kim, et al., "Performance analysis of SAR system using radar target simulation equipment," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 2, pp. 118-127, Feb. 2018.
- [6] S. Lu, Y. Deng, L. Wu, Q. Li, and G. Qin, "Simulation of monopulse radar under jamming environments based on space slicing," *Sensors*, vol. 25, no. 18, p. 5785, Sep. 2025.
- [7] J. M. Yang, J. H. Choi, M. S. Kwon, T. W. Kim, I. T. Han, and J. H. Im, et al., "Study on a radar module for active phased array radars," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 1, pp. 67-80, Jan. 2024.
- [8] T. Jeong, K. Oh, J. Y. Jung, and K. C. Hwang, "Field of view analysis of active phased array antenna with subarray TRM," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 3, pp. 190-205, Mar. 2022.
- [9] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, *Principles of Modern Radar: Basic Principles*, Raleigh, NC, Scitech Publishing, 2010.
- [10] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2016.
- [11] R. L. Burden, J. D. Faires, *Numerical Analysis*, 10th ed. Boston, MA, Cengage Learning, 2016.
- [12] S. M. Sherman, D. K. Barton, *Monopulse Principles and Techniques*, 2nd ed. Norwood, MA, Artech House, 2011.

박 인 호 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5464-9970>



시스템 등

2021년 2월: 건국대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2022년 8월: 건국대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2022년 9월~현재: 한화시스템 선임연구원
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더

정 대 교 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5977-4156>



2012년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
 2020년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학박사)
 2021년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 레이더 시스템, 신호처리