



Received: 2026/07/27
Revised: 2026/08/10
Accepted: 2026/08/27
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Myunghoon Park

333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea

Tel: +82-31-5179-7267

Fax: +82-31-5179-7086

E-mail: pmh604god@gmail.com

AESA 레이더의 전자주사각 증가에 따른 모노펄스 특성 변화 분석

Analysis of Monopulse Characteristic Variations with Increasing Electronic Scan Angle in AESA Radars

박명훈*, 김정, 이성균, 고진용, 장재덕

LIG 디펜스&에어로스페이스 M&S팀 수석연구원

Myunghoon Park*, Jeong Kim, Sungkyun Lee, Jinyong Go, Jaedeok Jang

Chief research engineer, M&S Team, LIG Defense&Aerospace

Abstract

AESA(active electronically scanned array) 레이더는 전자주사를 통해 신속한 빔 조향이 가능하지만, 전자주사각 증가에 따라 안테나 패턴과 모노펄스 특성이 변화한다. 본 연구에서는 uniform planar array 기반 AESA 레이더를 대상으로 전자주사각 변화에 따른 sum pattern, difference pattern 및 monopulse ratio 특성을 분석하였다. 전자주사각을 0°부터 60°까지 변화시키며 monopulse ratio 곡선을 생성하고 monopulse slope와 linear region width를 정량적으로 평가하였다. 분석 결과 전자주사각 증가에 따라 half-power beamwidth와 linear region width는 증가한 반면 monopulse slope는 감소하는 경향이 확인되었다. 이러한 결과는 전자주사각 증가가 모노펄스 각도추정 민감도에 영향을 미치며, 향후 전자주사각을 고려한 모노펄스 보정 기법 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

Active electronically scanned array (AESA) radars provide rapid beam steering through electronic scanning; however, their antenna and monopulse characteristics vary with increasing scan angle. The aim of this study was to analyze the sum pattern, difference pattern, and monopulse ratio characteristics of a uniform planar-array-based AESA radar as a function of electronic scan angle. Monopulse ratio curves were generated for scan angles ranging from 0° to 60°, and the monopulse slope and linear region width were quantitatively evaluated. The results show that the half-power beamwidth and linear region width increased with scan angle, whereas the monopulse slope decreased. These findings indicate that increasing scan angle reduces monopulse angle estimation sensitivity despite the expansion of the linear operating region, providing a useful basis for future monopulse compensation techniques.

Keywords

AESA 레이더(AESA Radar),
전자주사각(Electronic Scan Angle),
모노펄스 비율(Monopulse Ratio),
모노펄스 기울기(Monopulse Slope),
선형구간(Linear Region), 빔 조향(Beam Steering)

1. 서론

최근 능동위상배열(active electronically scanned array, AESA) 레이더는 빠른 전자주사 능력과 다중 표적 처리 능력을 기반으로 함정, 항공기 및 유도무기 체계의 핵심 센서로 널리 활용되고 있다. AESA 레이더는 기계적 구동 없이 빔 조향이 가능하므로 높은 추적 성능과 신속한 상황 대응이 가능하며, 넓은 탐지 영역에 대한 효율적인 감시 및 추적 기능을 제공한다.

레이더 추적 과정에서 표적의 각도 정보를 정밀하게 추정하기 위하여 모노펄스(monopulse) 기법이 널리 사용되고 있다. 모노펄스 기법은 합 채널(sum channel)과 차 채널(difference channel)의 신호 비율을 이용하여 표적의 각도 오차를 추정하는 방법으로, 높은 각도 추정 정확도와 우수한 잡음 내성을 제공한다. 일반적으로 모노펄스 레이더는 합 패턴과 차 패턴으로부터 생성되는 모노펄스 비율(monopulse ratio)을 이용하여 표적의 방위각 또는 고각 오차를 계산하며, 모노펄스 비율의 기울기는 각도 추정 성능을 결정하는 중요한 요소로 알려져 있다.

한편 AESA 레이더는 전자주사각이 증가함에 따라 배열의 유효 개구면(effective aperture)이 감소하고 빔 폭이 증가하는 특성을 가진다. 이러한 현상은 합 패턴 및 차 패턴의 형상을 변화시키며, 결과적으로 모노펄스 비율 곡선의 기울기와 선형 구간에도 영향을 미칠 수 있다. 특히 광각 전자주사 환경에서는 주엽(mainlobe)의

왜곡이 발생할 수 있으며, 이는 각도 추정 민감도 감소 및 추적 성능 저하의 원인이 될 수 있다.

기존 연구에서는 배열 안테나의 빔 조향 특성, 모노펄스 각도 추정 기법 및 추적 성능 향상 방안에 대한 다양한 연구가 수행되었다[1-4]. 그러나 전자주사각 변화에 따른 모노펄스 비율 특성의 변화를 정량적으로 분석하고, 모노펄스 기울기 및 선형 구간의 변화를 체계적으로 제시한 연구는 상대적으로 제한적이다. 또한 많은 모노펄스 각도 추정 기법은 특정 주사각에서 계산된 변환 계수를 기준으로 적용되는 경우가 많아 전자주사각 증가에 따른 성능 변화에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 uniform planar array(UPA) 기반 AESA 레이더를 대상으로 전자주사각 변화에 따른 모노펄스 특성을 분석하였다. 이를 위해 배열 인자(array factor)만을 고려한 모델을 구성하고, 방위각 방향 전자주사 환경에서 합 패턴, 차 패턴 및 모노펄스 비율 곡선을 생성하였다. 또한 전자주사각 증가에 따른 모노펄스 기울기, 선형 구간 폭 및 빔 폭 변화를 정량적으로 분석하여 각도 추정 성능에 미치는 영향을 고찰하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 UPA 기반 AESA 배열 구조와 모노펄스 비율 모델을 설명한다. 제3장에서는 전자주사각 변화에 따른 합 패턴, 차 패턴 및 모노펄스 비율 특성을 분석하고 모노펄스 기울기와 선형 구간 변화를 정량적으로 제시한다. 마지막으로 제4장에서는 결론을 기술한다.

2. AESA 배열 및 모노펄스 비율 모델

본 장에서는 전자주사각 변화에 따른 모노펄스 특성 분석을 위해 사용된 UPA 기반 AESA 레이더 모델을 설명한다. 먼저 배열 구조 및 좌표계를 정의하고, 합 패턴과 차 패턴 생성을 위한 배열 인자 모델을 기술한다[5-8]. 또한 모노펄스 비율 및 모노펄스 기울기의 정의를 통해 후속 장에서 수행되는 정량 분석 기준을 제시한다.

2.1 Uniform Planar Array 구조

본 연구에서는 능동위상배열 레이더의 전자주사 특성을 분석하기 위하여 UPA 구조를 적용하였다.

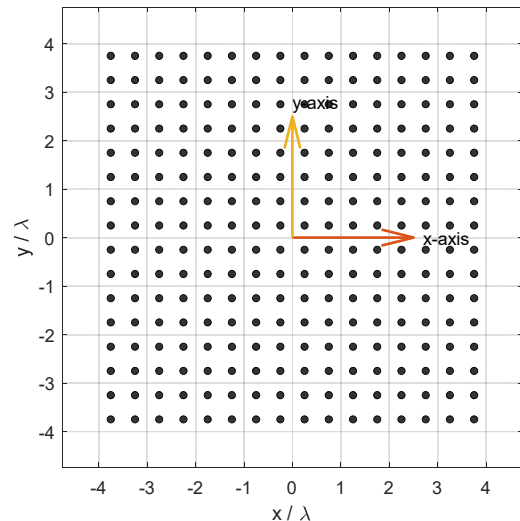


Fig. 1. UPA geometry and coordinate system

UPA는 동일한 간격으로 배치된 다수의 안테나 소자로 구성되는 평면 배열 구조로서, 각 소자에 인가되는 위상을 제어함으로써 기계적 회전 없이 원하는 방향으로 빔을 조향할 수 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 UPA 구조 및 좌표계를 나타낸다. 배열은 x축 및 y축 방향으로 균일하게 배치된 직사각형 형태의 평면 배열로 구성되며, 배열 중심을 원점으로 정의하였다. 방위각(azimuth)은 x-z 평면을 기준으로 정의하였으며, 고각(elevation)은 y축 방향을 기준으로 정의하였다. 또한 본 연구에서는 방위각 방향 전자주사 특성 분석에 초점을 맞추기 위하여 고각 방향 조향각은 0°로 고정하고 방위각 방향 조향각만 변화시키는 조건을 적용하였다.

UPA의 x축 방향 소자 수를 N_x , y축 방향 소자 수를 N_y 라 정의하고, 각 방향의 소자 간격을 각각 d_x [m] 및 d_y [m]라 정의하였다. 일반적으로 배열 안테나는 그레이팅 로브(grating lobe)의 발생을 방지하고 안정적인 빔 조향 특성을 확보하기 위하여 반파장 간격을 적용한다. 따라서 본 연구에서는 x축 및 y축 방향 소자 간격을 다음과 같이 설정하였다.

$$d_x = d_y = \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

여기서, λ : 파장(m).

전자주사 시 배열 각 소자에는 조향 방향에 대응하는 위상 천이(phase shift)가 인가되며, 이를 통해 원

하는 방향으로 빔이 형성된다. 일반적으로 전자주사각이 증가할수록 배열의 유효 개구면(effective aperture)이 감소하게 되며, 이에 따라 빔 폭 증가 및 주엽 왜곡 현상이 발생할 수 있다. 이러한 특성은 합 패턴(sum pattern) 및 차 패턴(difference pattern)의 형상 변화로 이어지며, 결과적으로 모노펄스 비율(monopulse ratio)의 기울기와 선형 구간에도 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 전자주사에 의해 발생하는 순수 배열 효과를 분석하기 위하여 소자 패턴(element pattern), 상호결합(mutual coupling), 진폭 오차 및 위상 오차 등의 실제 구현 요소는 고려하지 않았다. 따라서 전체 안테나 패턴은 배열 인자에 의해서만 결정되도록 모델링하였다.

2.2 Sum 및 Difference Pattern 생성

전자주사각 변화에 따른 모노펄스 특성을 분석하기 위하여 배열 인자(array factor)를 이용한 안테나 패턴 모델을 적용하였다. 본 연구에서는 소자 패턴(element pattern)을 고려하지 않았으므로 전체 안테나 패턴은 배열 인자에 의해서만 결정된다고 가정하였다.

UPA의 배열 인자는 각 배열 소자로부터 방사되는 신호의 위상 합으로 표현되며 다음과 같이 정의된다.

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{n=0}^{N_y-1} w_{m,n} \exp[jk(x_m(u-u_s) + y_n(v-v_s))] \quad (2)$$

여기서 $N_{x,y}$ 는 x, y축 방향 배열 소자 수, $w_{m,n}$ 는 배열 가중치, k 는 파수(rad/m), x_m 및 y_n 는 배열 중심을 기준으로 한 배열 소자의 위치(m), u, v 는 방위 및 고각 방향 코사인, u_s, v_s 는 방위 및 고각 전자주사 조향 방향 코사인을 뜻한다.

Direction cosine는 다음과 같이 정의된다.

$$u = \sin\theta\cos\phi, \quad v = \sin\phi \quad (3)$$

여기서, θ : 방위각(deg)
 ϕ : 고각(deg).

합 채널(sum channel)은 모든 배열 소자에 동일한 가중치를 적용하여 생성하였다. 따라서 sum pattern은 배열 인자와 동일하게 표현된다.

$$\sum(\theta, \phi) = AF(\theta, \phi) \quad (4)$$

반면 difference channel은 배열 중심을 기준으로 좌측 배열과 우측 배열에 서로 반대 부호의 가중치를 적용하여 생성하였다. 본 연구에서는 방위각 방향 모노펄스 생성을 위하여 좌측 배열에는 -1, 우측 배열에는 +1의 가중치를 적용하였다. 이에 따라 difference pattern은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{n=0}^{N_y-1} d_{m,n} \exp[jk(x_m(u-u_s) + y_n(v-v_s))] \quad (5)$$

여기서, $d_{m,n}$: Difference channel 가중치.

생성된 sum pattern과 difference pattern은 각각 최대값 기준으로 정규화하여 비교하였으며, Fig. 2와 같다. 또한 해당 패턴에 대해 방위각 방향 전자주사각을 변화시키면서 패턴 변화를 분석하였으며, 이를 이용하여 모노펄스 비율의 기울기 변화 및 선형 구간 변화를 정량적으로 분석하였다.

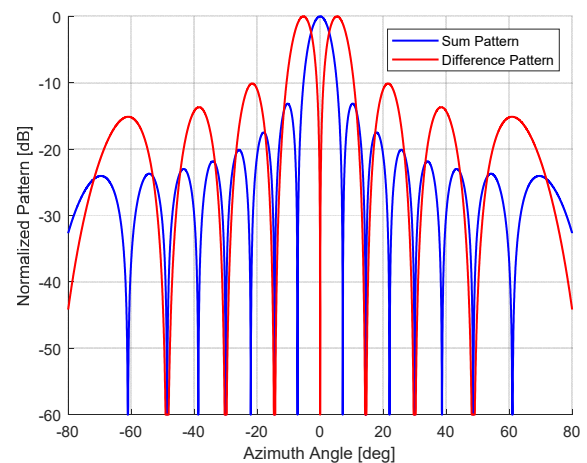


Fig. 2. Sum and Difference Pattern

2.3 생성 Monopulse Ratio 및 Slope 정의

모노펄스 레이더는 sum channel과 difference channel의 비율을 이용하여 표적의 각도 오차를 추

정한다. 일반적으로 방위각 방향 모노펄스 비율(monopulse ratio)은 difference pattern과 sum pattern의 비로 정의되며, 본 연구에서는 방위각 방향 모노펄스 비율을 다음과 같이 정의하였다.

$$R(\theta) = \text{Im} \left(\frac{\Delta(\theta)}{\Sigma(\theta)} \right) \quad (6)$$

여기서, $\Delta(\theta)$: 차 패턴

$\Sigma(\theta)$: 합 패턴

$\text{Im}(\cdot)$: 복소수의 허수부.

모노펄스 비율은 일반적으로 조향 방향 부근에서 선형적인 특성을 나타내며, 표적의 각도 오차는 모노펄스 비율을 이용하여 추정할 수 있다. 따라서 모노펄스 비율 곡선의 기울기는 각도 추정 민감도를 결정하는 중요한 성능 지표로 활용된다.

본 연구에서는 모노펄스 비율의 기울기를 모노펄스 슬로프(monopulse slope)로 정의하였으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_m = \left. \frac{dR(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta = \theta_s} \quad (7)$$

여기서, θ_s : 전자주사각(deg).

모노펄스 슬로프는 단위 각도 변화에 대한 모노펄스 비율의 변화량을 나타내며, 슬로프가 클수록 동일한 각도 오차에 대해 더 큰 모노펄스 비율 변화가 발생하므로 높은 각도 추정 민감도를 제공한다. 반대로 슬로프가 감소할 경우 동일한 비율 오차가 더 큰 각도 추정 오차로 변환될 수 있다.

또한 모노펄스 비율은 조향 방향 부근에서만 선형성을 유지하며, 일정 각도 이상에서는 비선형 특성이 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 모노펄스 비율 곡선에 대한 선형 회귀 오차가 일정 기준 이하인 영역을 선형 구간(linear region)으로 정의하고, 전자주사각 증가에 따른 선형 구간 폭의 변화를 분석하였다.

본 연구에서는 식 (6)의 모노펄스 비율과 식 (7)의 모노펄스 슬로프를 이용하여 전자주사각 변화에 따른 모노펄스 특성을 정량적으로 분석하였다. 또한 모노펄스 비율의 선형성을 기반으로 선형 구간 폭을 산출하여 전자주사각 증가에 따른 각도추정 특성 변화

를 평가하였다.

3. 시뮬레이션 및 분석 결과

본 장에서는 제2장에서 기술한 UPA 기반 AESA 레이다 모델을 이용하여 전자주사각 변화에 따른 모노펄스 특성을 분석하였다. 전자주사각을 0°부터 60°까지 변화시키면서 sum pattern, difference pattern 및 monopulse ratio를 생성하였으며, 이를 바탕으로 monopulse slope와 linear region 변화를 정량적으로 분석하였다. 또한 전자주사각 증가에 따라 발생하는 빔 폭 변화 및 모노펄스 특성 변화를 비교하여 각도추정 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

3.1 시뮬레이션 조건

본 연구에서는 UPA 기반 AESA 레이다를 대상으로 전자주사각 변화에 따른 모노펄스 특성을 분석하였다. 배열 구조는 x축 및 y축 방향으로 동일한 수의 배열 소자를 배치한 정사각 평면 배열을 적용하였으며, 배열 소자 간격은 반파장 간격으로 설정하였다. 또한 전자주사에 의한 순수 배열 효과를 분석하기 위하여 소자 패턴, 상호결합 및 하드웨어 오차는 고려하지 않았다.

전자주사는 방위각 방향으로만 수행하였으며, 전자주사각은 0°부터 60°까지 10° 간격으로 변화시켰다. 각 전자주사각에 대하여 sum pattern과 difference pattern을 생성하였으며, 생성된 패턴으로부터 monopulse ratio를 계산하였다. 또한 monopulse ratio의 선형 근사 결과를 이용하여 monopulse slope와 linear region width를 산출하였으며, Table 1은 본 연구에서 적용한 주요 시뮬레이션 조건을 나타낸다.

Table 1. Simulation parameters

Parameters	Value	Unit
Array Size	16 × 16	-
Element Spacing	0.5 λ	-
Scan Direction	Azimuth	-
Elevation Scan Angle	0	deg
Azimuth Scan Angle	0 ~ 60	deg
Scan Step	10	deg

Table 1의 조건을 기반으로 전자주사각 변화에 따른 sum pattern, difference pattern 및 monopulse ratio 특성을 분석하였으며, 이를 이용하여 monopulse slope와 linear region width의 변화를 정량적으로 평가하였다.

3.2 분석 결과

전자주사각 변화가 모노펄스 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 전자주사각을 0° 부터 60° 까지 변화시키며 sum pattern, difference pattern 및 monopulse ratio를 생성하였다. 또한 생성된 monopulse ratio를 이용하여 monopulse slope와 linear region width를 산출하고 전자주사각 증가에 따른 변화를 정량적으로 분석하였다.

Fig. 3는 전자주사각 변화에 따른 sum pattern을 나타낸다.

Broadside 방향인 0° 조향에서는 가장 좁은 빔폭과 대칭적인 주엽 형상이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 반면 전자주사각이 증가함에 따라 주엽 폭이 점차 증가하는 경향이 나타난다. 이러한 현상은 전자주사에 의해 배열의 유효 개구면(effective aperture)이 감소하기 때문이다. 평면 배열 안테나는 조향각이 증가할수록 빔 방향으로 투영되는 배열 길이가 감소하게 되며, 결과적으로 실제 개구면이 축소된 것과 동일한 효과가 발생한다. 일반적으로 안테나 빔폭은 개구면 크기에 반비례하므로 유효 개구면 감소는 빔폭 증가로 이어지게 된다. 따라서 Fig. 2에서 관찰되는 주엽 확산 현상은 전자주사에 의해 발생하는 대표적인 배열 특성으로 해석할 수 있다.

이와 같은 sum pattern의 변화는 difference pattern에도 직접적인 영향을 미친다. Fig. 4는 전자주사각 변화에 따른 difference pattern을 나타낸다.

Difference pattern은 모노펄스 각도추정에 사용되는 핵심 정보이며, 조향 방향 부근의 기울기가 각도 추정 민감도를 결정한다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 전자주사각이 증가할수록 difference pattern 중심부의 기울기가 감소하는 경향이 나타난다. 이는 Fig. 2에서 확인된 빔폭 증가 현상과 밀접한 관련이 있다. 주엽 폭이 증가하면 공간적으로 동일한 각도 변화에 대한 패턴 변화율이 감소하게 되며, 결과적으로 difference pattern의 중심부 기울기 또한 감소하게

된다. 따라서 전자주사각 증가에 따른 difference pattern 변화는 모노펄스 성능 저하의 직접적인 원인으로 작용한다.

Sum Pattern과 difference pattern의 변화는 최종적으로 monopulse ratio 형상 변화로 나타난다. Fig. 5는 전자주사각 변화에 따른 monopulse ratio를 나타낸다.

0° 조향에서는 조향 방향 부근에서 높은 선형성을 갖는 전형적인 S-curve 형태가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 전자주사각이 증가할수록 중심부 기울기가 감소하고 선형성이 유지되는 영역 또한 점차 축소되는 경향이 나타난다. 이는 difference pattern의 변화율 감소가 monopulse ratio에 직접 반영되기 때문이다. 결과적으로 동일한 각도 오차가 발생하더라도 생성되는 monopulse ratio 변화량은 감소하게 되며, 이는 각도추정 민감도 저하로 이어질 수 있다.

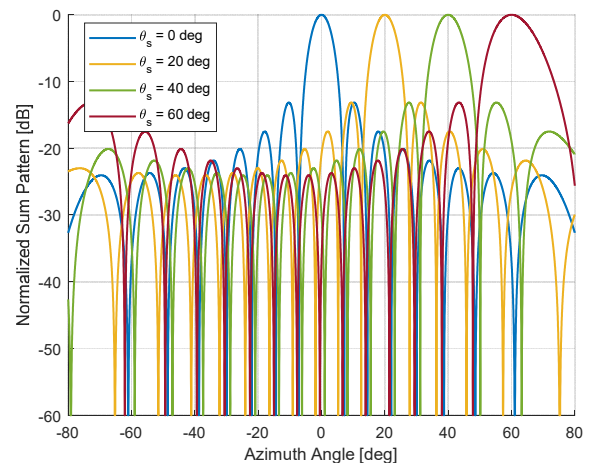


Fig. 3. Sum pattern according to electronic scan angle

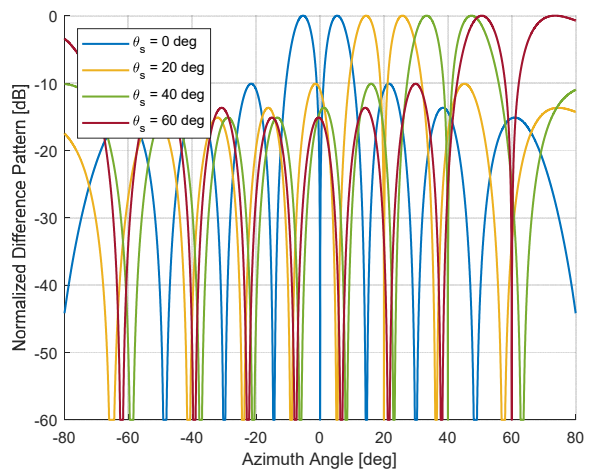


Fig. 4. Difference pattern according to electronic scan angle

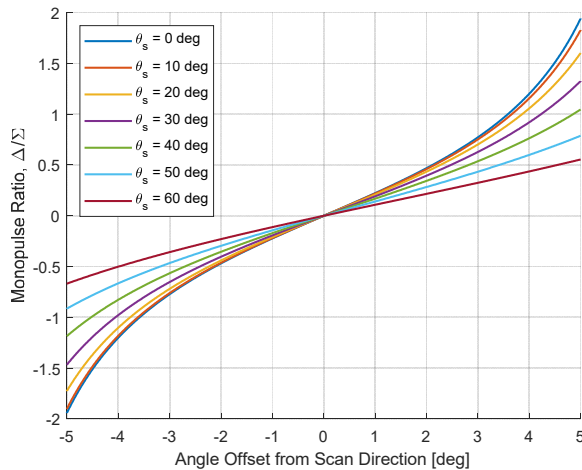


Fig. 5. Monopulse ratio according to electronic scan angle

또한 전자주사각이 증가할수록 S-curve 형상이 완만해지는 현상은 broadside 기준으로 설계된 모노펄스 변환 계수가 광각 전자주사 환경에서는 더 이상 유효하지 않을 수 있음을 의미한다.

이러한 변화를 보다 정량적으로 분석하기 위하여 monopulse ratio 중심부의 기울기를 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 monopulse slope는 전자주사각 증가에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 전자주사에 의해 감소한 유효 개구면이 difference pattern 중심부 기울기를 감소시키고, 결과적으로 monopulse ratio의 변화율을 감소시키기 때문이다. 모노펄스 레이더에서 monopulse slope는 각도 오차를 monopulse ratio로 변환하는 민감도를 의미하므로, slope 감소는 동일한 ratio 오차가 더 큰 각도 오차로 증폭될 수 있음을 의미한다. 따라서 전자주사각 증가에 따른 monopulse slope 감소는 각도추정 성능 저하의 근본적인 원인으로 해석할 수 있다.

Slope 변화와 함께 monopulse ratio의 선형성 또한 변화하게 된다. Fig. 7은 전자주사각 변화에 따른 linear region width를 나타낸다.

그 결과 전자주사각이 증가함에 따라 선형구간 폭은 약 4.7°에서 7.7°까지 점진적으로 증가하였다. 이러한 결과는 전자주사각 증가에 따라 모노펄스 비율 곡선이 각도 영역에서 넓고 완만한 형태로 변화하기 때문이다. 배열 응답은 방향 코사인 영역에서 형성되며, 방위각 방향의 방향 코사인은 전자주사각이 증가

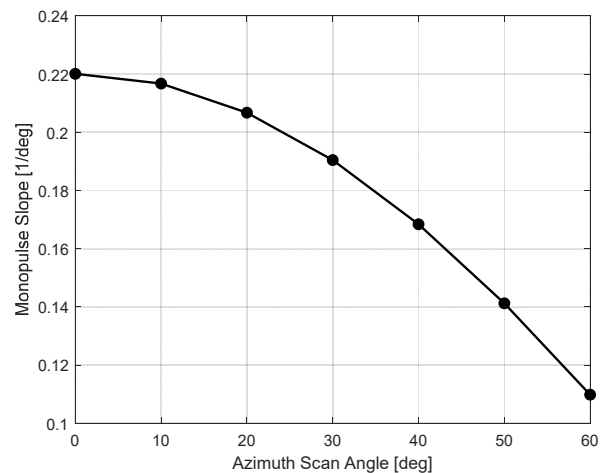


Fig. 6. Monopulse slope versus electronic scan angle

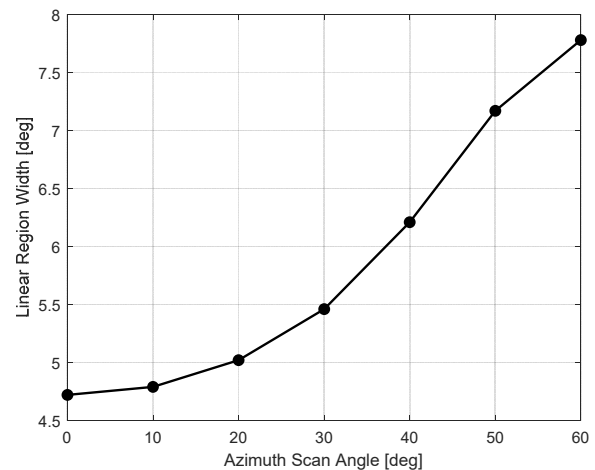


Fig. 7. Linear region width versus electronic scan angle

할수록 동일한 방향 코사인 변화량에 대응하는 각도 범위가 확대되는 비선형 관계를 갖는다. 이에 따라 방향 코사인 영역에서 유사한 폭을 갖는 모노펄스 비율 특성이 큰 전자주사각에서는 더 넓은 각도 범위로 변환되며, sum pattern의 빔폭 증가와 함께 선형구간 폭도 증가하는 결과가 나타난다.

또한 본 연구에서는 실제 모노펄스 비율과 중심부 선형 근사값 사이의 절대 편차가 설정된 허용 기준 이내인 연속 구간을 선형구간으로 정의하였다. 전자주사각이 증가하면 Fig. 6에서 확인한 바와 같이 monopulse slope가 감소하여 비율 곡선의 변화가 완만해지므로, 동일한 절대 편차 기준을 만족하는 각도 범위가 상대적으로 넓어진다. 따라서 Fig. 7의 선형구간 폭 증가는 전자주사에 따른 비율 곡선의 각도축 확장과 슬로프 감소가 함께 반영된 결과로 해석할 수 있다.

다만 선형구간 폭의 증가는 모노펄스 각도추정 성

능이 향상되었음을 의미하지 않는다. 전자주사각이 증가할수록 선형 근사를 적용할 수 있는 각도 범위는 확대되지만, 단위 각도 변화에 대한 모노펄스 비율 변화량은 감소한다. 이에 따라 수신 잡음이나 채널 오차에 의해 동일한 비율 측정 오차가 발생할 경우, 감소한 **monopulse slope**로 인해 해당 오차가 더 큰 각도 추정 오차로 환산될 수 있다. 결과적으로 전자주사각 증가에 따라 선형 적용 범위는 확대되는 반면 각도 추정 민감도는 저하되는 상충 관계가 형성되며, 광각 전자주사 환경의 성능 평가는 선형구간 폭만이 아니라 **monopulse slope**와 함께 수행되어야 한다.

Table 2는 전자주사각에 따른 **monopulse slope**, **linear region width** 및 **half power beamwidth**의 변화를 정량적으로 정리한 결과를 나타낸다.

Table 2. Quantitative results of monopulse characteristics according to electronic scan angle

Scan Angle	Monopulse Slope [deg]	Linear Region Width [deg]	HPBW [deg]
0°	0.22010	4.720	6.349
10°	0.21673	4.790	6.447
20°	0.20674	5.020	6.758
30°	0.19044	5.460	7.337
40°	0.16836	6.210	8.306
50°	0.14118	7.170	9.938
60°	0.10976	7.780	12.972

분석 결과 전자주사각이 증가함에 따라 **half power beamwidth**와 **linear region width**는 증가하고 **monopulse slope**는 감소하였다. 이는 전자주사에 의해 배열 응답이 각도 영역에서 넓고 완만하게 변화하는 일관된 특성을 보여주며, 전자주사각 증가가 모노펄스 비율의 선형 범위와 각도추정 민감도에 서로 다른 영향을 미친다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 **uniform planar array** 기반 능동위상배열 레이다를 대상으로 전자주사각 변화에 따른 모노펄스 특성을 분석하였다. 배열 인자 기반 모델을 이용하여 합 패턴, 차 패턴 및 모노펄스 비율을 생성하였으며, 전자주사각을 0°부터 60°까지 변화시키

면서 반전력 빔폭, 모노펄스 슬로프 및 선형구간 폭의 변화를 정량적으로 평가하였다.

분석 결과 전자주사각이 증가함에 따라 합 패턴의 반전력 빔폭이 증가하고, 모노펄스 비율 곡선은 각도 영역에서 넓고 완만한 형태로 변화하였다. 이에 따라 모노펄스 슬로프는 약 0.22에서 0.10으로 감소한 반면, 본 연구에서 적용한 고정 절대 편차 기준의 선형구간 폭은 약 4.7°에서 7.7°로 증가하였다. 이러한 변화는 배열 응답이 방향 코사인 영역에서 형성되고, 큰 전자주사각에서 동일한 방향 코사인 변화량이 더 넓은 각도 범위로 변환되는 기하학적 특성에 기인한다.

선형구간 폭의 증가는 선형 근사를 적용할 수 있는 각도 범위가 확대됨을 의미하지만, 모노펄스 각도추정 성능의 향상을 의미하지는 않는다. 전자주사각 증가에 따라 모노펄스 슬로프가 감소하면 단위 각도 변화에 대한 모노펄스 비율의 변화량이 작아지므로, 동일한 비율 측정 오차가 더 큰 각도추정 오차로 환산될 수 있다. 따라서 광각 전자주사 환경에서는 선형구간 폭과 모노펄스 슬로프 사이에 상충 관계가 형성되며, 모노펄스 성능은 두 지표를 함께 고려하여 평가할 필요가 있다.

본 연구는 소자 패턴, 상호결합, 진폭 및 위상 오차를 제외한 배열 인자 기반 분석을 통해 전자주사에 따른 순수 배열 효과를 규명하였다. 향후 연구에서는 전자주사각별 모노펄스 슬로프 변화가 잡음 환경의 실제 각도추정 편향과 오차에 미치는 영향을 정량화하고, 주사각에 따른 슬로프 변화를 반영할 수 있는 보정 기법을 연구할 예정이다.

참고문헌

- [1] Kyungmin Lee, Junil Ahn, Hongkyun Ryu, Unseob Jeong, & Ghiback Kim, 'Impact Analysis of Receiver Channel Errors in Quadrant Subapertures for Two-Dimensional Phase-Comparison Wideband Monopulse Direction Finding,' The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, VOL. 36, NO. 8, 2025, pp. 766-778.
- [2] Yunhui Zhang, Bo Pang, Dahai Dai, Bo Chen, & Zengkuan Tan, 'Performance Degradation in Monopulse Angle Measurement of Planar Phased-Array Due to Cross-Polarization Component,' Remote Sensing, VOL. 17, NO. 14, 2025, Article 2454.
- [3] Jinwoo Jung, Bagas Satriyotomo, & Seongmin Pyo, 'A Study of Direction-of-Arrival Estimation with an Improved

Monopulse Ratio Curve Using Beamforming for an Active Phased Array Antenna System,' *Electronics*, VOL. 12, NO. 24, 2023, Article 4906.

[4] Noman Ahmad, Haq Nawaz, Noshewan Shoaib, Qammer Hussain Abbasi, & Symeon Nikolaou, 'Ambiguity Resolution in Amplitude-Comparison-Based Monopulse Direction-Finding Antenna Systems,' *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, VOL. 22, NO. 10, 2023, pp. 2605–2609.

[5] Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems* (3rd ed.),

McGraw-Hill, 2001.

[6] Robert J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook* (3rd ed.), Artech House, 2018.

[7] M. A. Richards, Jim Scheer, & William A. Holm, *Principles of Modern Radar: Basic Principles*, SciTech Publishing, 2010.

[8] U. Nickel, 'Fundamentals of Signal Processing for Phased Array Radar,' in *Advanced Radar Systems, Signal and Data Processing*, NATO RTO, Educational Notes RTO-EN-SET-086bis, 2007.