THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2024 May; 35(5), 413～420.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2024.35.5.413
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

면 배열 AESA 시스템의 안정적인 모노펄스 왜곡 보정 설계에 대한 연구

Research on Stable Mono-Pulse Distortion Correction Design of 2-D Planar Array AESA System

유성현 · 김영완 · 장채운 · 주지한

Seong-Hyun Ryu · Young-Wan Kim · Chae-Un Jang · Ji-Han Ju

요 약

본 논문에서는 면 배열 AESA(active electronically scanned array) 시스템에서 안정적으로 모노펄스 기울기 보정이 가능한 알고리즘을 제시한다. 제시된 모노펄스 기울기 보정 기법은 각각의 모노펄스 수신기 채널에서 모노펄스 기울기가 최적일 때의 하드웨어 정렬값과 함께 상태값을 기억하고, 모노펄스 기울기 보정용 loop back 경로를 통해 보정 값을 추출하여 적용함으로써, 하드웨어의 성능저하 및 교체 상황에서도 최적의 모노펄스 기울기 성능을 유지 시킬 수 있다. 제시된 알고리즘을 교전급의 면 배열 AESA 시스템 운용환경에 맞추어 주기적으로 적용하면, 교전 표적에 대한 각도 추적 정확도 품질을 안정적으로 유지 시킬 수 있다. 본 논문에서는 해당 알고리즘에 대한 수식 제시와 함께 면 배열 AESA 시스템에 적용하여 검증함으로써, 제시된 보정 알고리즘의 타당성과 유효성을 확인하였다.

Abstract

This study proposes an algorithm that enables stable mono-pulse tilt correction in a surface-array active electronically scanned array (AESA) system. The proposed technique memorizes the state value and the hardware alignment value when the mono-pulse tilt is optimal in each mono-pulse receiver channel, and extracts and applies the correction value through the loop back path for mono-pulse tilt correction. The optimal mono-pulse slope performance can be maintained even with hardware performance degradation or replacement. If the proposed algorithm is periodically applied according to the operating environment in the surface-array AESA system used at the engagement level, the quality of the angle-tracking accuracy for the engagement target can be guaranteed to be stable. The feasibility and effectiveness of the proposed algorithm was confirmed by presenting a formula for the algorithm, and testing and analyzing it by applying a real surface array AESA system.

Key words: Mono-Pulse, Calibration, AESA, Receiver Channel, Loop Back Path

Ⅰ. 서 론

면 배열의 AESA(active electronically scanned array) 시스템에서는 하나의 펄스 신호를 통해 표적의 각도 정보를 추출하는 모노펄스 각도 추출 기법을 사용하며, 모노펄스 각도 추출 기법을 위해 그림 1과 같이 4등분된

LIG 넥스원(주) PGM탐색기연구소(RF Seeker R&D, LIG Nex1)
· Manuscript received April 28, 2024 ; Revised May 7, 2024 ; Accepted May 14, 2024. (ID No. 20240428-045)
· Corresponding Author: Seong-Hyun Ryu (e-mail: ryuspic@naver.com)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

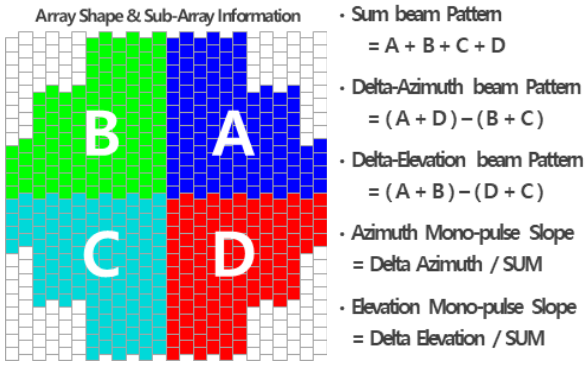


그림 1. 면 배열 AESA 시스템 모노펄스 개념
Fig. 1. Monopulse concept in surface array AESA system.

Aperture를 통해 빔 패턴을 합성함으로써 합, 차 방위각, 그리고 차 고각 빔 패턴을 형성한다[1],[2]. 형성된 빔 패턴들로 부터 수신한 표적 반사 신호는 합 빔 패턴을 기준으로 비교되어 HPBW(half power beam width) 내의 표적 각도 정보를 추출한다[3].

안테나 Aperture 면의 신호 크기와 위상 변화는 빔 패턴을 변형시켜 모노펄스 기울기를 왜곡시킨다. 또한, 합 빔 패턴에 대한 수신기 채널을 기준으로, 차 방위각 수신기 채널과 차 고각 수신기 채널의 비로써 모노펄스 기울기를 얻어내기에 수신기 채널의 특성 변화는 모노펄스 기울기를 왜곡시킨다. 따라서, AESA 시스템을 통한 표적 탐지 및 추적에 대한 각도 정확도 성능을 보장하기 위해서는 수신 빔 패턴 성능과 모노펄스 수신기 채널 간 진폭 및 위상 특성을 최적화 상태(보정 목표 상태)로 유지시켜야 한다. 본 논문에서 정의하는 “보정 목표 상태”는 면 배열 AESA 시스템의 평균 운용 조건인 하기와 같다.

보정 목표 상태: 상온 환경 (시스템의 ambient temperature 24±3℃, 습도 40~60 %)에서 시스템 운용을 통해 하드웨어 동작 온도를 포화(온도특성 안정화된 상태)시킨 뒤 제작 / 조립된 시스템에 대해 최적화된 송신, 수신 빔 패턴 및 모노펄스 기울기를 얻어낸 시점의 상태

모노펄스 기울기 왜곡은 능동소자가 포함된 하드웨어 구성품들의 온도 변화 및 고장 구성품의 교체에 따른 하드웨어 성능변화로 발생한다. 따라서, AESA 시스템 운용 간에 구성품들의 온도변화에 따른 성능변화를 고려하여 주기적 on-line 보정뿐만 아니라, 고장 난 능동소자 구성품 교체 이후에는 반드시 보정을 수행하여, 보정 목표 상태를 유지 시켜 줘야 한다. 면 배열 AESA 시스템의 수신 빔 패턴은 다수 개의 TRM(transmit receiving module)이 면으로 분포하기 때문에, 일부 TRM의 수신 성능 왜곡에도 영향이 거의 없다[4]. 따라서, 본 논문에서는 모노펄스 기울기 왜곡 보정을 위한 수신기 채널 간 보정 내용을 다루며, 기존에 수신 채널 간의 편차를 보정하는 방식이 아닌, 모노펄스 기울기가 최적인 상태로 회귀 보정을 수행함으로써 수신 경로상의 온도특성 변화 및 임의의 구성품 교체 후에도 안정적으로 보정 목표 상태를 유지할 수 있는 설계를 제안한다.

본 논문의 II장에서는 모노펄스 기울기 왜곡 보정 알고리즘에 대해 설명하고, III장은 모노펄스 왜곡 보정 알고리즘 검증 시험을 통해 방법의 유효성을 확인하며, IV장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

Ⅱ. 모노펄스 기울기 왜곡 보정 알고리즘 설계

모노펄스 기울기 왜곡 보정을 위해서는 그림 2와 같이 주경로 상에 보정하고자 하는 하드웨어 구성품에 보정 신호를 주입하고, 보정 연산을 수행하는 처리기를 통해 보정신호를 수집할 수 있는 loop back 경로가 필요하다.

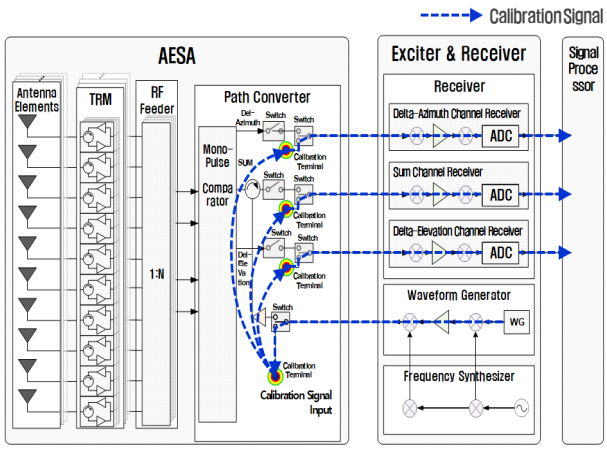


그림 2. AESA 시스템의 모노펄스 기울기 보정경로의 예
Fig. 2. Example of mono-pulse slope correction path in AESA system.

그림 2의 loop back 경로는 파형발생기에서 보정하고자 하는 주파수 f_k에 대한 보정용 CW(continuous wave) 신호를 생성하여 인가시키면, 경로변환기를 통해 능동위상배열안테나 송신 경로가 아닌 보정 쪽으로 경로를 변환시켜, 보정하고자 하는 수신기로 신호를 주입하고, 처리기에서 loop back 신호를 수집한다. 이러한 loop back 경로를 통한 보정 대상은 주경로 상에 존재하는 능동소자들이기에 주경로를 제외한 보정 경로 상에는 능동소자 구성을 배제하여 온도에 의한 성능 변화가 주경로에서만 발생하도록 설계해야 한다.

모노펄스 기울기 왜곡 보정은 보정 목표 상태의 모노펄스 기울기로 되돌리기 위함이며, 표 1의 모노펄스 기울기 보정 가중치($Z_{Name}^{RCV,Cal}$)를 찾아서 식 (1)과 같이 수신되는 비디오 신호에 가중치를 적용하는 것을 의미한다.

표 1. 모노펄스 기울기 보정에 사용되는 파라미터
Table 1. Parameters used to calibrate mono-pulse slope.

Item	Contents
f_k	*k*-th frequency channel
Name	Receiver channel name, S (Sum), DEl (Delta-Elevation), DAz (Delta-Azimuth)
t_{Align}	Mono-pulse slope alignment time point
t_{Cal}	Mono-pulse slope calibration time point
$W_{Name}^{RCV}(f_k)$	Mono-pulse slope weighting that simultaneously applies mono-pulse slope alignment and calibration $W_{Name}^{RCV}(f_k) = Z_{Name}^{RCV,Align}(f_k) \cdot Z_{Name}^{RCV,Cal}(f_k)$
$Z_{Name}^{RCV,Align}(f_k)$	Mono-pulse slope alignment weighting $Z_{Name}^{RCV,Align}(f_k) = A_{Name}^{RCVC,Align}(f_k) \cdot e^{j\left(\Phi_{Name}^{RCV,Align}(f_k)\right)}$
$Z_{Name}^{RCV,Cal}(f_k)$	Mono-pulse slope calibration weighting $Z_{Name}^{RCV,Cal}(f_k) = A_{Name}^{RCVC,Cal}(f_k) \cdot e^{j\left(\Phi_{Name}^{RCVC,Cal}(f_k)\right)}$
$z_{Name}^{RCV,Cal}(f_k)$	The output value measured through the calibration path to find the mono-pulse slope calibration weight $z_{Name}^{RCV,Cal}(f_k) = a_{Name}^{RCVC,Cal}(f_k) \cdot e^{j\left(\phi_{Name}^{RCVC,Cal}(f_k)\right)}$
$z_{Name}^{RCV,ref}(f_k)$	Mono-pulse slope calibration reference values compared to find mono-pulse slope calibration weights $z_{Name}^{RCV,ref}(f_k) = a_{Name}^{RCVC,ref}(f_k) \cdot e^{j\left(\phi_{Name}^{RCVC,ref}(f_k)\right)}$
$g^{RCVC,EXT}(f_k)$	Complex calibration signal gain of active elements excluding receiver on main receiving path
$\Delta g^{RCVC,EXT}(f_k, t_{Cal} - t_{Align})$	Changed complex calibration signal gain of active elements excluding the receiver on the receiving main path for $t_{Cal} - t_{Align}$ time
$L_{Name}^{RCVC,C}(f_k)$	Complex calibration signal gain value of mono-pulse slope calibration path excluding main path
$a^{RCVC}(f_k)$	Calibration signal applied to the calibration path through the waveform generator
$g_{Name}^{RCVC,RCV}(f_k)$	Complex receive gain value of receiver channel
$\Delta g_{Name}^{RCVC,RCV}(f_k, t_{Cal} - t_{Align})$	Changed complex receive gain value of the receiver channel on the receive main path for $t_{Cal} - t_{Align}$ time
$g\,W_{Name}^{RCV}(f_k)$	DCA(digital control attenuation) applied values inside the receiver channel for performance such as NAGC(noise auto gain control)[6] and AGC(auto gain control)[6] DCA reference: $g\,W_{Name}^{RCV}(f_k) = 1$ (0 dB)
$b_{Name}^{RCV}(f_k, t_{Align})$	The calibration signal output value finally output from the receiver channel by turning the calibration path at the time of alignment of the mono-pulse slope

$$IQ_{Name}^{Weighted\,Monopulse}(f_k) = W_{Name}^{RCV}(f_k) \cdot IQ_{Name}^{Original}(f_k) \quad (1)$$

여기서, $IQ_{Name}^{Weighted\,Monopulse}(f_k)$는 주파수 f_k에 대해 수신기 채널 Name에서 모노펄스 기울기 보정이 적용된 I, Q 신호이고, $IQ_{Name}^{Original}(f_k)$는 주파수 f_k에 대해 수신기 채널 Name에서 측정된 I, Q 신호이며, $W_{Name}^{RCV}(f_k)$는 주파수 f_k에 대한 모노펄스 기울기 보정 가중치이다.

모노펄스 기울기 보정 가중치를 찾기 위해서는 모노펄스 기울기 정렬 가중치($Z_{Name}^{RCV,Align}$)와 모노펄스 기울기 정렬 시점에서의 모노펄스 기울기 보정 기준값($Z_{m,n}^{RCV,ref}$)을 찾아야 한다.

표 1은 모노펄스 기울기 보정에 대한 주요 파라미터들을 보이며, 하기 파라미터들을 기반으로 모노펄스 기울기 왜곡 보정 기법을 기술한다.

그림 3은 모노펄스 기울기 보정경로 상에서 표 1의 파라미터를 나타내고, 그림 4는 모노펄스 기울기 보정 절차를 보인다.

면 배열 AESA 시스템 제작 후 검증 시 AESA의 수신 빔 패턴 성능을 보장하기 위해 내부 TRM들의 수신경로 이득과 위상을 측정하여 Aperture 면에서 Aperture weight와 위상이 설계된 대로 나오도록 수신 빔 정렬을 수행한다[5]. 정렬된 합 빔 패턴 결과를 기준으로 차 고각과 방위각 빔 패턴 결과를 이용하여 모노펄스 기울기 정렬을 수행하

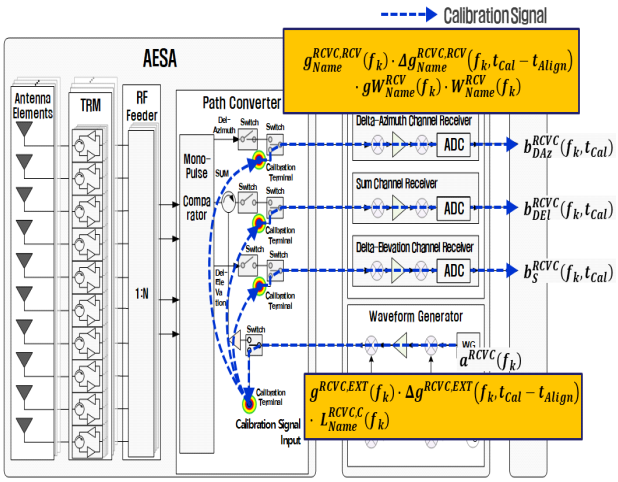


그림 3. 모노펄스 기울기 보정경로 상의 파라미터 동작
Fig. 3. Parameter operation on mono-pulse slope correction path.

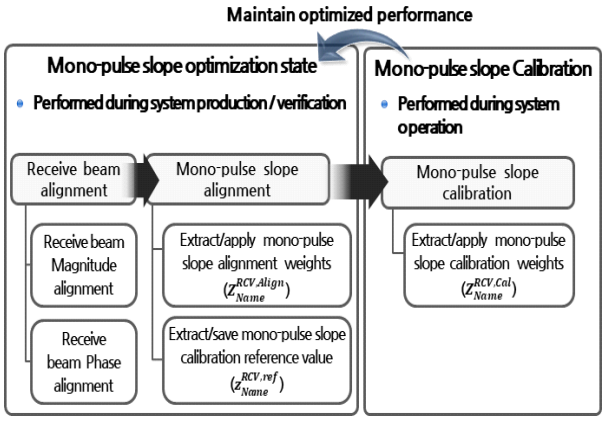


그림 4. 모노펄스 기울기 보정 절차
Fig. 4. Calibration procedure for mono-pulse slope.

고, 모노펄스 기울기 정렬 가중치 추출 시점의 하드웨어 성능을 기억하기 위해 그림 2의 보정경로로 얻어지는 모노펄스 보정 기준값을 추출하여 저장한다. 면 배열 AESA 시스템 운용 간에는 모노펄스 기울기 보정을 통해 초기 모노펄스 기울기 최적화 상태(정렬 상태)를 유지시킨다.

2-1 모노펄스 보정 기준값 추출($z_{Name}^{RCV,ref}$)

모노펄스 보정 기준값은 AESA 시스템 운영 중 수신경로상의 구성품 특성 변화 또는 교체 시 보정 목표 상태로 성능을 되돌리기 위해 사용하는 기준으로써, 근역장 시험장과 같은 AESA 빔 패턴을 측정할 수 있는 시설에서 AESA 수신 빔 정렬 및 모노 펄스 기울기 정렬 가중치 추출 시점에 획득한다.

그림 3과 같이 수신기 채널 내의 NAGC(noise auto gain control)[6]등에 사용되는 DCA(digital control attenuator)를 $g\,W_{Name}^{RCV}(f_k) = 1$ (0 dB)로 설정하고, 모노펄스 기울기 가중치 $W_{Name}^{RCV}(f_k) = 1$의 상태에서 입력신호 $a^{RCV}(f_k)$를 인가하여 수신기 채널별 출력인 $b_{Name}^{RCVC}(f_k, t_{Align})$을 저장하여 얻는다.

$$b_{Name}^{RCVC}(f_k, t_{Align}) = a^{RCVC}(f_k) \cdot g^{RCVC,EXT}(f_k) \cdot L_{Name}^{RCVC}(f_k) \cdot g_{Name}^{RCVC,RCV}(f_k) \quad (2)$$

여기서, t_{Align}: 모노펄스 기울기 정렬 시점이며, 저장된 모노펄스 보정 기준값은 식 (3)~식 (5)와 같다.

$$z_{Name}^{RCV,ref}(f_k) = b_{Name}^{RCVC}(f_k, t_{Align}) = a_{Name}^{RCVC,ref}(f_k) \cdot e^{j\{\phi_{Name}^{RCVC,ref}(f_k)\}} \quad (3)$$

$$a_{Name}^{RCVC,ref}(f_k) = \left| a^{RCVC}(f_k) \cdot g^{RCVC,EXT}(f_k) \cdot L_{Name}^{RCVC}(f_k) \cdot g_{Name}^{RCVC,RCV}(f_k) \right| \quad (4)$$

$$\phi_{Name}^{RCVC,ref}(f_k) = \angle \left\{ a^{RCVC}(f_k) \cdot g^{RCVC,EXT}(f_k) \cdot L_{Name}^{RCVC}(f_k) \cdot g_{Name}^{RCVC,RCV}(f_k) \right\} \quad (5)$$

2-2 모노펄스 기울기 정렬 가중치($Z_{Name}^{RCV,Align}$)

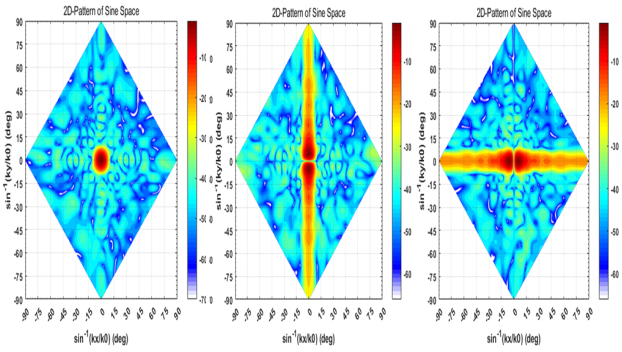
AESA 수신 빔 정렬상태에서 Bore-sight 방향에 대해 방사 패턴을 측정하여 합 패턴 기준으로 차 방위각 및 고각에 대한 모노펄스 기울기를 구하고, 이를 "보정 목표 상태"로 만들기 위한 가중치를 추출한다.

그림 5는 각 수신기 채널별 2D 빔패턴을 보이고, 최대 크기 위치$(\theta_{\max}, \phi_{\max})$의 복소값은 식 (6)과 같다.

$$M_{Name} = F^{Rx,Name}\left(f_k, \theta_{\max}^{Name}, \phi_{\max}^{Name}\right) \quad (6)$$

여기서, $F^{Rx,Name}$은 수신기 채널명 Name을 통해 측정되는 빔 패턴이다.

측정된 각 수신기 채널별 2-D 빔 패턴으로 부터 모노펄스 기울기를 추출하기 위해서는 수신기 채널별 하드웨어의 크기와 위상을 설계 결과(M&S 결과)와 동일하게 정렬시켜야 하며, 이를 위해 식 (7) 및 식 (8)과 같이 D_{S-D}와 $|M_{Name}|$으로 Normalization된 빔 패턴을 이용해 크기를 정렬시키고, 수신경로 상에서 발생한 위상 차이를 $\Phi_{DEl/S}$, $\Phi_{DAz/S}$ 를 통해 맞춰주어 모노펄스 기울기가 복소수가 아닌 실수 또는 허수만 존재하도록 정렬시킨다.



(a) 합 패턴 (b) 차 고각 패턴 (c) 차 방위각 패턴
(a) Sum pattern (b) Delta-El pattern (c) Delta-Az pattern

그림 5. 수신기 채널별로 수신한 빔 패턴
Fig. 5. Beam pattern for each channel received from the receiving channel.

정렬된 차 고각 모노펄스 기울기:

$$\frac{F^{Rx,t,DEl}/(D_{S-D}|M_{DEl}|)}{F^{Rx,t,S}/|M_S|} \cdot e^{-j\{\Phi_{DEl/S}\}} \quad (7)$$

정렬된 차 방위각 모노펄스 기울기:

$$\frac{F^{Rx,t,DAz}/(D_{S-D}|M_{DAz}|)}{F^{Rx,t,S}/|M_S|} \cdot e^{-j\{\Phi_{DAz/S}\}} \quad (8)$$

여기서, D_{S-D}는 설계결과상의 합 수신패턴 최댓값과 차 수신패턴 최댓값 간의 차이 값이다. 식 (9)는 모노펄스 기울기 정렬값과 보정값으로 구성된 모노펄스 기울기 가중치를 보이고, 식 (9)~식 (11)은 수신기 합 채널을 기준으로 차 고각과 차 방위각 수신기 채널의 모노펄스 정렬 가중치를 보이며, 모노펄스 정렬 당시의 수신기 채널 간의 하드웨어 성능 편차를 맞춰주는 기능을 수행한다. 모노펄스 정렬 가중치는 식 (9)의 구성요소로써, 송수신기 또는 처리기에 저장하여 주기적 보정 시, 식 (1)과 같이 적용해준다.

$$W_{Name}^{RCV}(f_k) = Z_{Name}^{RCV,Align} \cdot Z_{Name}^{RCV,Cal} \quad (9)$$

$$Z_S^{RCV,Align} = 1 \quad (10)$$

$$Z_{DEl}^{RCV,Align} = Z_S^{RCV,Align} \cdot \frac{|M_S|}{D_{S-D}|M_{DEl}|} \cdot e^{-j\{\Phi_{DEl/S}\}} \quad (11)$$

$$Z_{DAz}^{RCV,Align} = Z_S^{RCV,Align} \cdot \frac{|M_S|}{D_{S-D}|M_{DAz}|} \cdot e^{-j\{\Phi_{DAz/S}\}} \quad (12)$$

2-3 모노펄스 보정 가중치 추출($Z_{Name}^{RCV,Cal}$)

모노펄스 보정 가중치는 변경된 하드웨어 성능을 보정 목표 상태로 성능을 되돌리기 위한 값으로써, 시스템 운용 간에 하드웨어 성능이 변경되는 시간 간격에 따라 추출하여 적용한다. 모노펄스 보정 가중치를 추출하기 위해서, 수신기 채널 내의 NAGC(noise auto gain control)[6] 기능 제어를 위해 사용하는 DCA(digital control attenuator)를

시스템 운용에 필요한 값으로 설정하고(예를 들어, $gW_{Name}^{RCV}(f_k)=2$(3 dB)), 모노펄스 기울기 가중치 $W_{Name}^{RCV}(f_k)=1$의 상태에서 입력신호 $a^{RCV}(f_k)$를 인가하여 수신기 채널별 출력인 $b_{Name}^{RCVC}(f_k,t_{Cal})$을 저장하여 얻는다.

$$\begin{aligned} b_{Name}^{RCVC}(f_k,t_{Cal}) &= a^{RCVC}(f_k)\cdot g^{RCVC,EXT}(f_k) \\ &\cdot \Delta g^{RCVC,EXT}(f_k,t_{Cal}-t_{Align})\cdot L_{Name}^{RCVC}(f_k) \\ &\cdot g_{Name}^{RCVC,RCV}(f_k)\cdot gW_{Name}^{RCV}(f_k) \\ &\cdot \Delta g_{Name}^{RCVC,RCV}(f_k,t_{Cal}-t_{Align}) \end{aligned} \tag{13}$$

여기서, t_{Cal}: 모노펄스 기울기 보정 시점이며, 모노펄스 기울기 보정 가중치의 추출시점은 모노펄스 기울기 정렬 가중치 추출시점과 차이가 있기에, $t_{Cal}-t_{Align}$ 시간 동안 변경된 주경로상의 하드웨어 성능 변화량인 $\Delta g^{RCVC,EXT}(f_k,t_{Cal}-t_{Align})$와 $\Delta g_{Name}^{RCVC,RCV}(f_k,t_{Cal}-t_{Align})$, 그리고, 운용 중 NAGC[6] 기능을 위해 사용한 DCA 설정값 $gW_{Name}^{RCV}(f_k)$이 추가된 형태로 측정된다. 저장된 모노펄스 보정경로 출력값은 식 (14)~식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} z_{Name}^{RCV,Cal}(f_k) &= b_{Name}^{RCVC}(f_k,t_{Cal}) \\ &= a_{Name}^{RCVC,Cal}(f_k)\cdot e^{j\left(\phi_{Name}^{RCVC,Cal}\right)} \end{aligned} \tag{14}$$

$$a_{Name}^{RCVC,Cal}(f_k)=\left|b_{Name}^{RCVC}(f_k,t_{Cal})\right| \tag{15}$$

$$\phi_{Name}^{RCVC,ref}(f_k)=\angle\left\{b_{Name}^{RCVC}(f_k,t_{Cal})\right\} \tag{16}$$

식 (17)~식 (19)는 모노펄스 보정 가중치($Z_{Name}^{RCV,Cal}$) 수식을 보이며, 모노펄스 보정 기준값에서 모노펄스 보정 가중치를 나누어줌으로써 보정경로 상의 능동소자 크기 및 위상의 특성 변화량이 제거됨을 확인할 수 있다.

$$Z_{Name}^{RCV,Cal}(f_k)=\frac{z_{Name}^{RCV,ref}(f_k)}{z_{Name}^{RCV,Cal}(f_k)}=A_{Name}^{RCVC,Cal}\cdot e^{j\left(\Phi_{Name}^{RCVC}\right)} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} &A_{Name}^{RCVC,Cal} \\ &=\frac{1}{\left|\begin{array}{l}\Delta g^{RCVC,EXT}(f_k,\Delta t)\cdot \Delta g_{Name}^{RCVC,RCV}(f_k,\Delta t)\\ \cdot gW_{Name}^{RCV}(f_k)\end{array}\right|} \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{Name}^{RCVC} &= \phi_{Name}^{RCVC,ref}-\phi_{Name}^{RCVC,Cal} \\ &= -\angle\left\{\begin{array}{l}\Delta g^{RCVC,EXT}(f_k,\Delta t)\cdot \Delta g_{Name}^{RCVC,RCV}(f_k,\Delta t)\\ \cdot gW_{Name}^{RCV}(f_k)\end{array}\right\} \end{aligned} \tag{19}$$

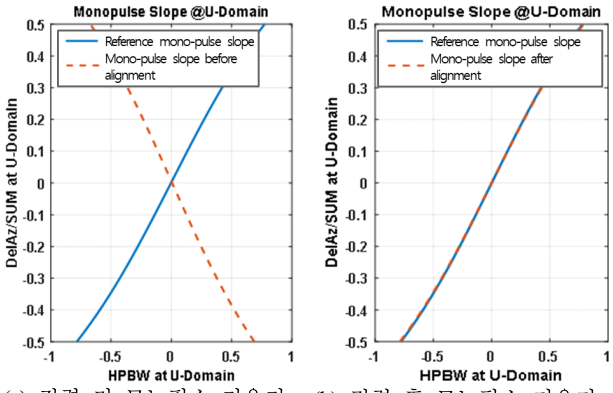
여기서, Δt는 $t_{Cal}-t_{Align}$를 나타낸다.

면 배열 AESA 시스템에서의 모노펄스 기울기는 전자빔 조향 및 주파수에 따라 별도로 추출하여 보관할 필요 없이 bore-sight 빔조향각 및 중심 주파수 빔패턴으로 부터 k_x,k_y 좌표계상의 모노펄스 기울기 값을 추출하여 왜곡 없는 모노펄스 기울기를 사용할 수 있다. 하지만 모노펄스 기울기 정렬, 보정 기준값 추출, 그리고 보정 가중치 추출은 AESA 시스템 수신경로상의 주파수 왜곡 특성을 보상하기 위함이기에, 하드웨어 성능이 변경될 수 있는 주파수 샘플들에 대해 각각 수행해야 한다.

Ⅲ. 모노펄스 왜곡 보정 알고리즘 검증시험

면 배열 AESA 시스템을 구성하여 II절에서 기술한 수신 빔 정렬을 수행한 후 모노펄스 기울기 정렬 전의 모노펄스 기울기는 그림 6(a)와 같다. 정렬 전에 틀어진 양은 수신경로상의 크기 이득 2 dB와 위상 차이 134 degree이며, 이는 모노펄스 기울기를 크게 왜곡시킨다. 수신기 채널별 빔 패턴을 통해 신호의 크기와 위상을 정렬시킴으로써, 그림 6(b)와 같이 기준 모노펄스와 일치시켰다.

그림 7(a)는 모노펄스 기울기 정렬 이후에 발생될 수 있는 하드웨어의 성능변화를 가정하기 위해, 차 방위각 수신경로에 2 dB의 감쇄기와 72 degree 위상 왜곡을 유발하는 케이블을 삽입한 후 측정한 모노펄스 기울기이다.

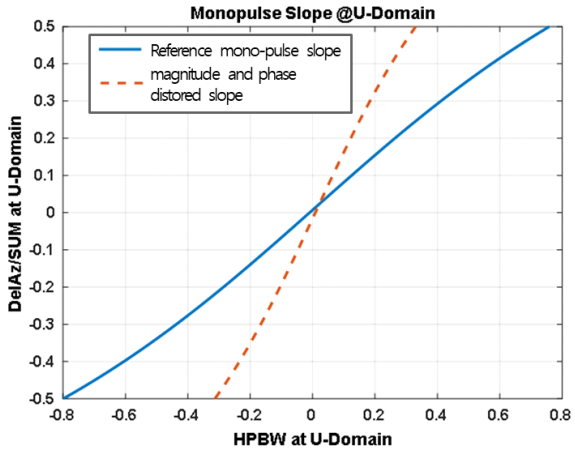


(a) 정렬 전 모노펄스 기울기 (b) 정렬 후 모노펄스 기울기

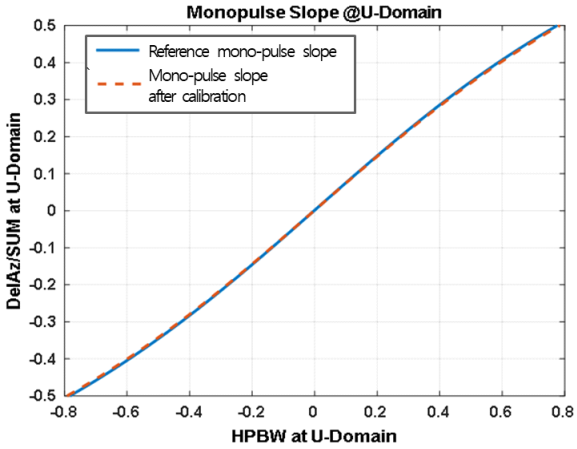
(a) Mono-pulse slope before alignment (b) Mono-pulse slope after alignment

그림 6. 모노펄스 정렬 알고리즘 적용

Fig. 6. Application of mono-pulse alignment algorithm.



(a) 수신경로 상의 크기/위상 왜곡에 따른 모노펄스 기울기
(a) Mono-pulse slope according to magnitude/phase distortion



(b) 수신경로 상의 크기/위상 왜곡 보정 후 모노펄스 기울기
(b) Monopulse slope after calibration of magnitude / phase distortion

그림 7. 모노펄스 보정 알고리즘 적용
Fig. 7. Application of mono-pulse calibration algorithm.

모노펄스 기울기 정렬 이후에 발생되는 하드웨어 성능 변화는 그림 7(a)와 같이 기울기 왜곡을 발생시키며, 본 논문에서 제안한 알고리즘으로 보정 한 결과, 그림 7(b)와 같이 시스템에서 요구하는 기준 모노펄스 기울기 성능으로 복원됨을 확인하였다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 면 배열 AESA 시스템의 모노펄스 기울기 보정 방법을 제시하였다. 제시된 보정 알고리즘이 실제 시스템에 적용되었을 때, 안정적으로 모노펄스 기울기 보정 기능이 수행됨을 수식과 실험을 통해 검증하였다.

기존방식의 모노펄스 기울기 보정은 합 수신, 차 고각 수신, 차 방위각 수신 채널 상호 간에 편차를 계속적으로 비교하기에, 기준이 되는 수신채널 교체 시 기준 수신채널의 변경으로 인해 처리기에서 여러 조합에 대해 모노펄스 보정을 수행해야 하지만, 본 논문에 제시된 방안은 각각의 수신기 채널별로 모노펄스 기울기가 최적일 때의 상태값을 저장하여 최적의 상태로 되돌리는 방법을 적용함으로써, 수신기 고장 시에도 교체된 수신기 채널만을 보정함으로써, 안정적으로 모노펄스 기울기의 보정이 가능하다.

교전 급으로 사용되는 면 배열 AESA 시스템에서는 대상표적에 대해 엄격한 각도 추적 정확도 품질이 요구되며, 왜곡 없는 모노펄스 기울기 특성이 각도 추적 정확도 성능에 주요 요소이기 때문에 본 논문에 제시된 모노펄스 기울기 보정 알고리즘을 교전 표적에 대해 추적 빔 운용 전 및 주기적으로 운용해 주면 각도 추적품질을 안정적으로 보장해 줄 수 있다[7].

본 논문에서는 합, 차 고각, 차 방위각, 그리고 SLB 수신기 채널을 갖는 경우에 대해 기술하였지만, Sub-Array 형태의 면 배열 AESA 시스템 및 완전 디지털 형태의 면 배열 AESA에도 동일한 알고리즘을 통해 손쉽게 모노펄스 기울기 왜곡을 보정할 수 있다.

References

[1] S. M. Sherman, D. K. Barton, *Monopulse Principles and Techniques*, 2nd ed. Norwood, MA, Artech House, pp. 1-16, 2011.

[2] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, Feb. 2008.

[3] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, 2nd ed. New York, NY, Chapman & Hall/CRC, Mar. 2005.

[4] Y. R. Lee, J. P. Kim, Y. Kang, and S. J. Kim, "Array error analysis and correction of active array antenna for AESA radar", *The Journal of Korean Institute of Electro-*

magnetic Engineering and Science, vol. 26, no. 4, pp. 414-423, Apr. 2015.

[5] J. W. Yu, H. Chae, J. Park, J. H. Lim, D. H. Kim, and H. S. Jin, et al., "Near-field Rx-measurement for active phased array of digital radar using calibration cath", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 6, pp. 504-511, Jun. 2016.

[6] K. S. Kim, "Noise automatic gain control to stabilize radar performance", *The Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 132-137, Dec. 2007.

[7] H. Meikel, *Modern Radar Systems*, 2nd ed. Norwood, MA, Artech House, Mar. 2008.

유 성 현 [LIG넥스원/수석연구원]

https://orcid.org/0000-0003-0680-2496

2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2005년 2월～2008년 3월: LG전자 Mobile Communication 연구소 주임연구원

2008년 4월～현재: LIG 넥스원㈜ 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열안테나 시스템 설계/분석, 시스템 모델링&시뮬레이션, 초고주파 회로/시스템

장 채 운 [LIG넥스원/연구원]

https://orcid.org/0009-0006-2331-1735

2023년 2월: 한양대학교 전자공학부 (공학사)

2023년 2월～현재: LIG넥스원㈜ 연구원

[주 관심분야] 마이크로웨이브 탐색기, 초고주파 회로 및 시스템

김 영 완 [LIG넥스원/수석연구원]

https://orcid.org/0000-0001-6404-8335

2005년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)

2007년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)

2007년 2월～현재: LIG 넥스원㈜ 수석연구원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 레이다 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 등

주 지 한 [LIG넥스원/수석연구원]

https://orcid.org/0000-0003-0643-6246

2004년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)

2008년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)

2008년 7월～현재: LIG 넥스원㈜ 수석연구원

[주 관심분야] 마이크로웨이브 탐색기, 초고주파 회로 및 시스템