

다중 수동 탐색빔을 형성하는 다기능 레이더의 정밀한 표적 방위각 선정 기법

고 현 우*

A Precise Target Azimuth Decision Technique for Multi-function Radar forming Multiple Passive Surveillance Beam

Hyunwoo Ko*

요 약

한정된 자원에서 다기능을 수행하는 다기능 위상배열 레이더는 많은 수의 표적을 수동형 탐색을 이용한 탐색중추적(TWS, Track While Scan) 기능을 통해 주로 관리한다. 다중빔을 형성하여 빔그리드가 고정된 탐색영역을 수동적으로 탐색할 때 측정되는 방위각 정보는 특히 장거리 이동 표적에 대해 편차가 크게 발생하는 문제점이 있다. 본 논문에서는 한 표적에 대해 측정되는 방위각이 다중 빔과 다중 파형 스케줄에 의해 다수 발생하는 점에 착안하여 그들 중 최적의 값을 계산하는 방식을 제시하였다. 제안기법은 각 처리단계에서 측정되는 방위각 값들을 구조화하고, 구조화된 값들을 TWS의 예측치와 비교하여 MMSE 관점에서 가장 최적의 방위각을 계산한다. 제안기법의 성능은 실제 환경의 장거리 항공기 표적 실데이터를 활용하여 기존방식들 대비 향상되었음을 확인하였다.

Abstract

A multi-function phased array radar, which operates multiple functions within limited resources, manages many number of targets using a function called Track While Scan(TWS) which uses measurements from a Passive-Multibeam surveillance mode. Azimuth angles which are measured during multiple beams passively search a certain coverage with formed grids have a large deviation, especially for long-range moving targets. Thus, we proposed an optimal azimuth decision technique based on the idea which numbers of azimuth angles are measured from a target due to multiple beams and multiple PRF schedule. The proposed technique structures every processing phase of azimuth measurements and finding an optimal result in perspective of MMSE criterion by comparison the structured measurements with a prediction value of TWS. We verified that the proposed technique outperforms conventional techniques by utilizing empirical data which includes radar measurements of a long-range aircraft in real environments.

Keywords

precise azimuth, azimuth correction, radar angle, multi-function radar, multi-beam radar

* 국방과학연구소 연구원(교신저자)
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2491-0095>

· Received: Apr. 19, 2023 Revised: May 08, 2023, Accepted: May 11, 2023
· Corresponding Author: Hyunwoo Ko
Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, DaeJeon, 34186, Korea
Tel.: +82-42-821-2082, Email: kohyunwoo@add.re.kr

1. 서 론

레이더는 공간상에 RF 신호를 송신해 표적과 레이더간 상대적인 거리, 각도, 속도, 신호세기 등을 측정하는 장비이다. 그중 각도 정보는 표적의 위치 정확도와 추적 연속성을 결정하는 중요한 지표이다. 기존에는 넓은 범위를 탐지하는 수동형 탐색레이더 보다는 특정 표적을 조준한 펜슬빔 기반의 능동 추적레이더에서 주로 각도 정확도를 중요시했다.

레이더의 발전은 하나의 레이더가 탐색과 추적의 다양한 기능을 더 넓은 범위에 빠르고 많이 수행하는 방향으로 진행되고 있다. 이에 따라 각각의 기능에 특화된 기계적인 구동방식 기반의 레이더들은 다기능을 수행할 수 있는 고정형 디지털 위상배열 레이더라는 형태로 융합되고 있다[1]. 최근 들어 군사용 레이더에 요구되는 처리 표적 수는 수백에서 수천개로 증가되고 있기 때문에, 능동 추적 기능만으로는 감당하지 못해 수동 탐색 기능에서도 표적을 추적하며 관리하는 탐색추적(TWS, Track While Scan) 방식이 개발되어 사용되고 있다[2].

빔폭을 좁게 형성하려면 안테나의 크기를 키우고 고대역 주파수를 사용하면 되지만, 이동 플랫폼에 설치하는 레이더의 경우 공간적, 주파수사용 한계가 존재하기 때문에 각도 정확도를 높이는데 어려움이 있다[3]. 또한 수동 탐색빔은 빔 그리드가 고정되어 스케줄에 따라 해당 구역을 탐지하기 때문에 추적 빔처럼 표적을 능동적으로 추적하지 못하므로, 빔 그리드 사이에 존재하여 빔 이득이 줄 경우 표적의 각도 추정값은 정확도가 떨어진다[4]. 설계된 고정 빔 그리드 사이에 인터빔을 형성하여 정확도를 높이는 방법[5]이 제시되었으나, 레이더 자원의 한계로 인해 전방위에 대한 인터빔 형성은 실제 적용하기 어렵다. 다양한 센서 정보를 융합하는 연구[6]도 진행되었으나 단일 Mono-static 레이더에 대한 해결 방법은 아니다.

더군다나 다수의 PRF(Pulse Repetition Frequency) 스케줄을 가지는 파형을 사용하는 레이더의 경우 하나의 Dwell time에서 N개의 Burst에 의해 다수의 각도가 계산되므로, 잘못 계산된 한 두 개의 Burst의 각도값들이 처리 방식에 따라 최종 각도 정확도를 떨어트릴 수 있다. 장거리 표적이 고정된 빔

그리드 사이에 존재하고 수신신호가 파형 특성에 의해 folding 되어 클러터 근처에 존재할 경우 잘못 측정되는 SNR에 의해 방위각 정확도는 매우 떨어질 수 있다.

따라서 본 논문에서는 다중 수동 탐색빔 기반의 다기능 위상배열 레이더를 대상으로 데이터 구조화와 TWS를 활용하여 정밀한 방위각 추정 방식을 제안한다. 본문 2장에서는 다중 수동탐색빔 운용 시 각도추정 방식과 방위각 오차에 대해 살펴보면, 3장에서는 제안하는 알고리즘을 살펴본다. 4장에서는 실제 클러터 환경에서 측정된 데이터를 통해 제안 알고리즘의 성능을 평가하고 5장에서 결론을 도출한다.

II. 다중빔 수동 탐색 시 방위각 계산

다기능 위상배열 레이더는 전자적 빔조향을 통해 탐색구역을 방위방향으로 이산적(Discrete)으로 스캔한다. 이때, 고각 방향으로 다중 수신빔이 형성되어 있으면 고각 정보를 계산할 수 있는 3차원 레이더이며, 그렇지 않으면 2차원 레이더이다. 특정 방위각 구간에 탐색 파형을 송수신하는 단위시간을 Dwell time이라고 하며, 1 Dwell time의 송신(Tx) 및 수신(Rx) 빔 형성은 아래 그림 1과 같이 목적에 맞게 설계할 수 있다. 1 Dwell time 동안 송수신 하는 동안 레이더가 조향하는 방위각 구간을 본문에서는 Dwell이라 지칭한다.

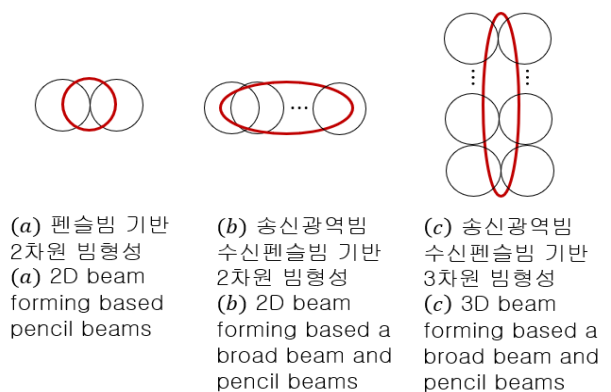


그림 1. 2차원(a,b) 및 3차원(c) 레이더 1 dwell time의 다중빔형성 예시 (빨강원: 송신빔 3dB빔폭, 검정원: 수신빔 3dB빔폭)

Fig. 1. Example of multiple-beam forming of 2D(a,b), 3D(c) radar at a certain dwell time (Red circle: Tx 3dB beam width, black circle: Rx 3dB beam width)

i번째 CPI(Coherent Pulse Interval)에서 탐지된 j번째 Hit의 각도 $\theta_{az\ or\ el}^{CPI(i,j)}$ 계산은 수신빔별 신호세기의 절대값의 합과 차 비율을 이용한 모노펄스 계산방식으로 아래와 같이 계산할 수 있다[7].

$$\theta_{az\ or\ el}^{CPI(i,j)} = \theta_{grid}^{Rx}(n, m) + \frac{\Delta\theta_{3dB}^{Rx}}{k_{mono}} \times \frac{\Delta A_{n,m}^{i,j}}{\sum A_{n,m}^{i,j}} \quad (1)$$

위에서 $\theta_{grid}^{Rx}(n, m)$ 는 n번째 Dwell time에 해당하는 m번째 수신빔의 레이더 메모리에 저장된 중심각도이며, $\Delta\theta_{3dB}^{Rx}$ 는 수신빔 3dB 빔폭, k_{mono} 는 모노펄스 기울기를 나타낸다. 변수 $\Delta A_{n,m}^{i,j}$ 와 $\sum A_{n,m}^{i,j}$ 는 각각 n번째 Dwell에 형성된 m번째 수신빔에서 탐지된 i번째 CPI의 j번째 Hit의 인접빔간 신호세기 차와 합을 의미한다. 방위각 계산일 경우 방위 인접빔에 대해, 고각 계산일 경우 고각 인접빔에 대해 수행한다. i번째 CPI 내에 탐지된 다수의 Hit들의 방위각은 아래의 집합으로 표현할 수 있다. 본문은 방위각을 대상으로 하므로 아래첨자 az 표시는 생략한다.

$$\theta_{az}^{CPI(i,j)} \in \theta^{CPI(i)}, (i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, J) \quad (2)$$

위에서 변수 N는 설계에 따라 가변적이며 J는 매 Dwell 마다 측정되는 Hit 수로 가변적인 값이다. 향후 본문에서 갯수를 나타내는 변수는 대문자로, 몇 번째를 나타내는 변수는 소문자로 표기하며, 모두 가변적인 값을 명시한다.

2.1 Dwell 내 방위각

PRI(Pulse Repetition Interval) 길이가 다른 N개의 Burst를 한 Dwell time에 사용하는 경우 N개의 CPI가 형성되고, 동일 표적에 대해 N개 이상의 방위각이 계산될 수 있다. 이때, N개 이상의 방위각이 발생할 수 있는 이유는 대형 표적이나 헬기와 같이 거리와 도플러 성분에 대한 extended target은 신호처리 단계에서 클러스터링 방식에 따라 분리될 수 있다. 아래 그림은 N=4의 경우 송신빔 방위각 중심이 45deg($\theta_{DW_n}^{Tx}=45deg$)인 Dwell 내에서 다수 스캔동안 출력된 CPI Plot 방위각($\theta^{CPI(i,j)}$)들의 실제데이터 예시이다.

그림 2는 한 표적에 대해 한 Dwell 내에서 다수 스캔동안 탐지된 CPI Plot들의 방위각을 도시한 것이며, 특정 스캔의 한 Dwell time 동안 N개 이상의 다수의 방위각이 출력된 것을 확인할 수 있다.

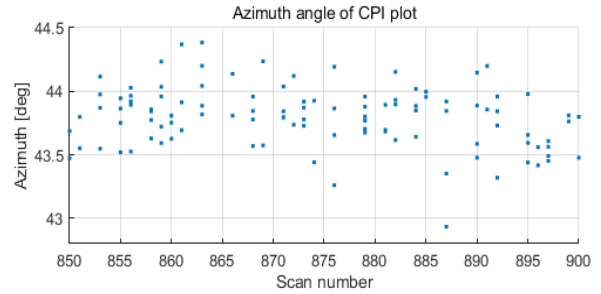


그림 2. 1개 표적에 대한 1 Dwell 내 CPI Plot 방위각 다수 스캔 결과 예시

Fig. 2. Example of azimuth angles of CPI plots in a Dwell for a target during multiple number of scans

2.2 Dwell 간 방위각

동일 표적에 대해 인접한 Dwell의 수신빔에서도 표적이 탐지될 수 있다. 이는 빔폭과 빔그리드 설계, 그리고 고출력으로 송신하는 레이더에 따라 나타날 수 있다. 아래 그림은 인접한 Dwell 사이에 표적이 진행한 데이터 예시를 나타낸다.

그림 3에서 각 Dwell에 해당하는 방위각을 분리해 보면 그림 4와 같다. 아래 그림에서, n-1번째 Dwell(송신빔 센터 방위각: $\theta_{DW_{n-1}}^{Tx}=42.5deg$)과 인접한 n번째 Dwell($\theta_{DW_n}^{Tx}=45deg$)에서 측정된 CPI plot들을 확인할 수 있다.

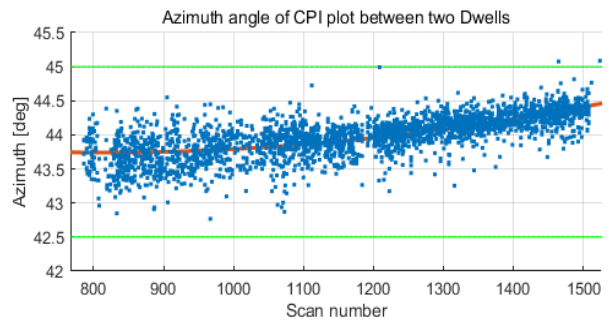


그림 3. 인접한 Dwell 사이(초록선 사이) 표적 예상궤적(빨강선)과 CPI 방위각(파랑점)

Fig. 3. CPI Plot Azimuth(Blue dot) between successive Dwells(b/w grin lines) with target expected trajectory(Red line)

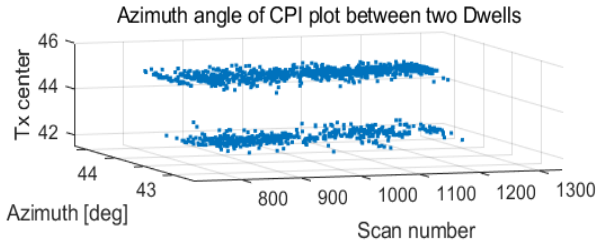


그림 4. 각 Dwell별 방위각 분류
Fig. 4. Azimuth angles with respect to each Dwell

2.3 방위각 선정 방식

앞서 2.1절과 2.2절을 통해, 신호처리 결과 후 하나의 표적에 대해 한 scan에 한 개의 방위각을 선정하기 위해서는 Dwell 내, Dwell 간 처리가 필요함을 확인할 수 있다. 그림 5의 Block Diagram은 다중빔을 형성하는 수동 탐색에서 제시할 수 있는 방위각 계산의 흐름을 나타낸다.

PRI 길이가 다른 N개의 Burst를 사용하는 MPRF 기반 레이더는 거리 및 속도 모호성을 제거하는 과정에서 거리와 속도가 유사한 CPI Plot들을 그룹화한다. 이때, u번째로 그룹화된 CPI Plot들의 방위각들의 집합 G_u^{CPI} 은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\theta^{CPI(i,j)} \in G_u^{CPI}, (G_u^{CPI} \in \theta^{CPI}, u = 1, \dots, U) \quad (3)$$

n번째 Dwell 내 u번째 그룹화된 CPI Plot들의 대표 방위각 $\theta^{DW(n,u)}$ 은 아래와 같이 계산하며, Dwell Plot 방위각으로 지칭한다.

$$\theta^{DW(n,u)} = f_{C1}(G_u^{CPI}) \quad (4)$$

위에서 함수 $f_{C1}(\cdot)$ 은 방위각의 대푯값을 선정하는 1차 클러스터링 함수로 3장에서 확인한다. 만약 PRI 길이가 동일한 Burst만을 사용한다면 이 과정은 생략될 수 있다.

n번째 Dwell 내에 형성되는 Dwell Plot 방위각들의 집합 $\theta^{DW(n)}$ 은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\theta^{DW(n,u)} \in \theta^{DW(n)}, (u = 1, \dots, U) \quad (5)$$

인접된 L개의 Dwell에서 탐지된 표적은 Dwell 간 2차 방위각 클러스터링을 수행할 수 있다. 2차 클러스터링은 인접한 Dwell에서 Dwell Plot 방위각들이 유사한 값을 가질 경우 그룹 G_h^{DW} 으로 그룹화한다.

$$\theta^{DW(n',u)} \in G_h^{DW}, (G_h^{DW} \in \theta^{DW}) \quad (6)$$

$$n' = n - L, \dots, n \quad (7)$$

$$h = 1, \dots, H \quad (8)$$

위에서 θ^{DW} 는 인접 Dwell들의 Dwell Plot 방위각 총 집합을 나타낸다. h번째 그룹화된 Dwell Plot들의 방위각은 함수 $f_{C2}(\cdot)$ 를 통해 대푯값 θ_s^h 을 선정하며 이때 아래첨자 s는 s번째 스캔을 나타낸다.

$$\theta_s^h = f_{C2}(G_h^{DW}) \quad (9)$$

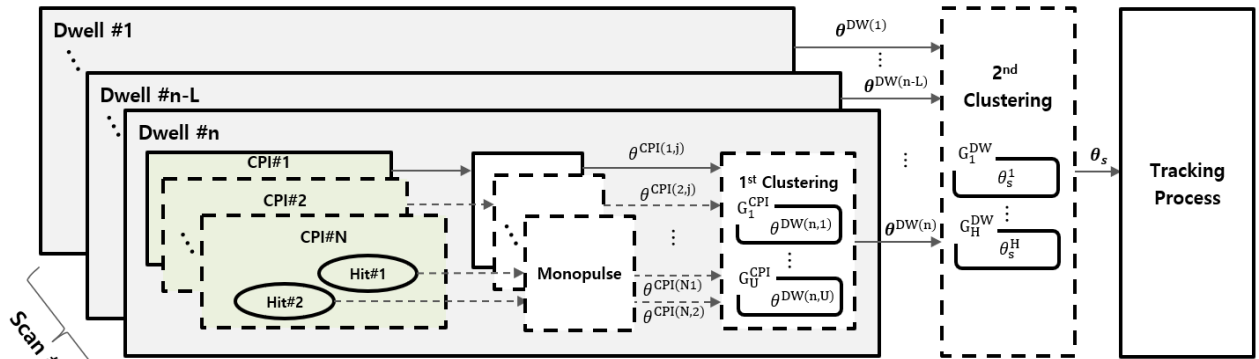


그림 5. 다중빔 형성 수동 탐색 시 방위각 계산 흐름 (점선: 설계에 따라 생략할 수 있는 부분)
Fig. 5. Block diagram of azimuth computation process (Dashed line: optional parts with respect to a design strategy)

대푯값 θ_s^h 는 Plot 방위각으로 지칭하며, 이 값은 레이더 추적 알고리즘의 입력값이 된다. Plot 방위각들의 총 집합은 벡터 θ_s 로 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\theta_s^h \in \theta_s, (h = 1, \dots, H) \quad (10)$$

종합하여, 표적의 물리적 특성과 레이더 설계에 따라 한 개 표적에 대해 다수의 방위각 측정치가 넓은 범위에 분포하여 발생할 수 있으며, 정확도를 높이는 1차 2차 클러스터링 과정을 통해 추적 단계의 입력 방위각을 선정하게 된다.

III. 데이터 구조화와 TWS를 이용한 방위각 정밀화 기법

3.1 알고리즘 흐름

본문에서 제안하는 알고리즘은 아래 그림 6을 통해 확인할 수 있다. 모노펄스 계산을 통해 계산된 CPI Plot들의 방위각을 1차 클러스터링을 통해 Dwell Plot 방위각 θ^{DW} 으로 선정하고, Dwell 간 2차 클러스터링을 통해 Plot 방위각 θ_s 으로 선정한다. 이때

각 클러스터링 단계에서 대표로 선정된 방위각은 클러스터링 되었던 후보 방위각들을 구조화(Structure)하고 저장하여 매칭 관계를 유지할 수 있도록 한다.

선정된 Plot 방위각들은 레이더 내 표적 DB의 트랙 예측치 \hat{X}^s 와 연관처리(Association) 과정을 통해 트랙과 측정치를 일대일 매칭을 시켜준다. 일대일로 매칭된 Plot θ_s^h 는 Dwell Plot과 CPI Plot의 값들을 전부 가지고 있으므로, 그들 중에서 가장 최적의 값을 선택하여 최종 방위각 측정치 θ_{fin} 로 선정한다. 각 단계의 방식은 아래 3.2 장에서 확인한다.

3.2 세부 알고리즘

3.2.1 Clustering & structuring

클러스터링된 각도값들의 대푯값 선정은 신호의 크기를 기반으로 처리되며 크게 최대신호크기 선정 방식과 무게중심 방식 두 가지가 많이 사용된다.

1st Clustering에서, u번째 CPI 그룹 내 신호크기가 가장 큰 방위각을 선정하는 경우 아래와 같이 계산할 수 있으며 2.3절의 함수 $f_{c1}(\cdot)$ 에 해당하는 내용이다.

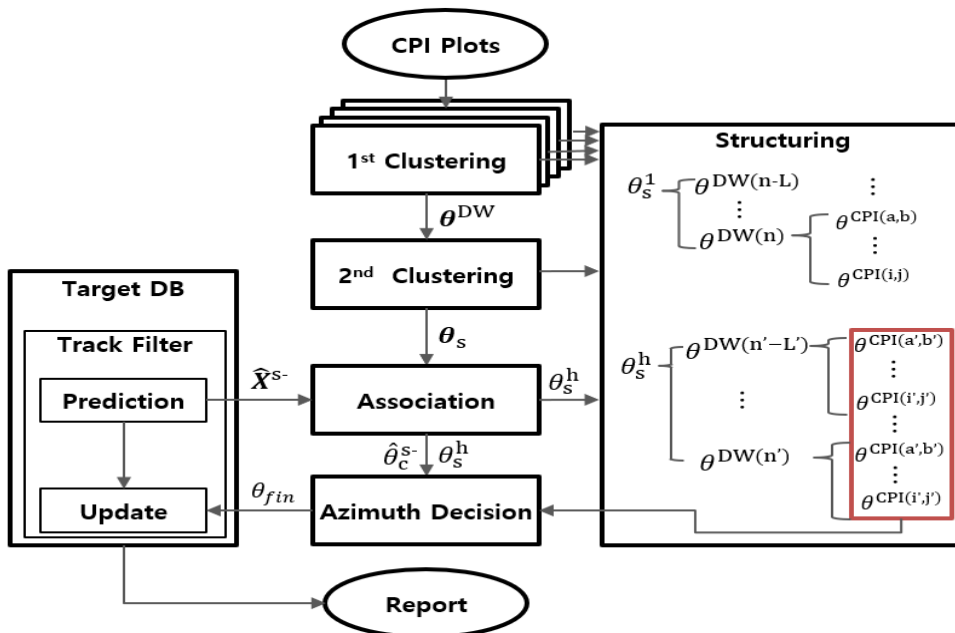


그림 6. 제안 알고리즘 흐름
Fig. 6. Proposed algorithm flow

$$idx = \arg \max_k (A(G_u^{CPI}(k))) \quad (11)$$

$$\theta^{DW(n,u)} = G_u^{CPI}(idx) \quad (12)$$

무계중심 방식을 활용하는 경우,

$$\theta^{DW(n,u)} = \frac{\sum_{k=1}^K A(G_u^{CPI}(k)) \times G_u^{CPI}(k)}{\sum_{k'=1}^K A(G_u^{CPI}(k'))} \quad (13)$$

으로 계산한다. 위에서 $A(\cdot)$ 는 해당 인자의 신호 크기를 나타내고, $G(k)$ 는 그룹 내 k 번째 방위각을 나타낸다.

위 과정에서 사용된 한 그룹의 CPI Plot 방위각과 신호크기들은 Structure 구조로 그림 7과 같이 메모리에 저장한다.

2nd Clustering의 경우 식 (11)~(13)을 동일하게 적용할 수 있으며, 클러스터링에 사용된 방위각과 신호 크기는 그림 8과 같이 저장한다.

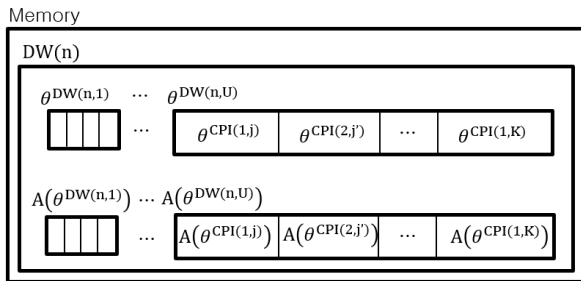


그림 7. 첫 번째 클러스터링에서 CPI 그룹 Plot 방위각 및 신호크기 저장 개념도

Fig. 7. Storing azimuth and amplitude of CPI group plots at 1st clustering

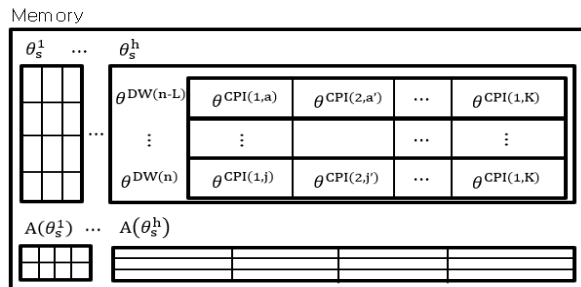


그림 8. 두 번째 클러스터링에서 CPI 그룹 Plot 방위각 및 신호크기 저장 개념도

Fig. 8. Storing azimuth and amplitude of CPI group plots at 2nd clustering

메모리 용량을 고려하여 1차 클러스터링의 CPI Plot 후보군 수 K 와 2차 클러스터링의 연속된 Dwell 수 L 를 제한할 수 있으며, 본문에서 $K=4, L=5$ 로 설정한다.

본문에서는 1, 2차 클러스터링은 최대한 빠르게 처리하는 최대신호크기 선정 방식을 사용하여 연관 처리를 수행할 수 있도록 한다. 다기능레이더는 전 방위에 퍼져 존재하는 다양한 표적들과 클러터 환경에 의해 발생하는 허위를 합해 처리해야 할 측정치가 매우 많기 때문에 1, 2차 클러스터링에서는 최대한 빠르게 대푯값을 선정하여 다음 알고리즘으로 진행하도록 한다.

3.2.2 Prediction & association

예측은 TWS 과정에서 이미 트랙화 된 표적의 동특성을 이용하여 다음 시간스텝의 표적 위치를 예측하는 것이다. 시스템마다 사용하는 트랙(추적) 필터에 따라 다르며, 본 논문에서는 IMM Kalman Filter를 사용한다.

연관처리는 측정치와 트랙간의 연관관계를 설정하는 처리단계로, 시스템마다 사용하는 방식을 사용할 수 있다. 본문에서는 Nearest-Neighbor(NN) 방식으로 연관처리를 수행한다. 위 내용들에 대한 자세한 사항은 [8]에서 확인할 수 있다.

3.2.3 Azimuth decision with spread information

앞서 3.2.2 과정을 통해 트랙의 측정치로 연관된 Plot 방위각 θ_s^h 는 최대 $K \times L$ 개의 CPI Plot 방위각 정보를 보유하고 있다. 이 방위각들을 전부 펼쳐서 아래와 같은 1차원 행렬을 구성한다.

$$\Phi = [\theta_{DW(n-L)}^{CPI(1,j)}, \dots, \theta_{DW(n-L)}^{CPI(4,j')}, \dots, \theta_{DW(n)}^{CPI(1,j'')}, \dots, \theta_{DW(n)}^{CPI(4,j''')}] \quad (14)$$

표적의 실제 방위각은 측정된 값 뿐만 아니라 각도 사이에 존재할 수 있으므로, CPI Plot 전부의 방위각 무계중심값 $\bar{\theta}_{all}$ 과 신호크기가 제일 큰 3개의 CPI Plot 방위각 무계중심값 $\bar{\theta}_{T3}$ 을 위 매트릭스에 추가한다.

$$\Phi' = [\Phi, \bar{\theta}_{all}, \bar{\theta}_{T3}] \quad (15)$$

$$\bar{\theta}_{all} = \frac{\sum_{k=1}^{K \times L} A(\Phi(k)) \times \Phi(k)}{\sum_{k'=1}^{K \times L} A(\Phi(k'))} \quad (16)$$

$$\bar{\theta}_{T3} = \frac{\sum_{k=1}^3 A(\Phi_{sort}(k)) \times \Phi_{sort}(k)}{\sum_{k=1}^3 A(\Phi_{sort}(k'))} \quad (17)$$

위에서 Φ_{sort} 는 신호크기가 큰 순으로 정렬한 행렬이다. 최종적으로 방위각 θ_{fin} 은 펼쳐진 방위각 정보에 추가된 무게중심값들 중 표적 아이디 c 의 트랙 예측치(Prediction) $\hat{\theta}_c^{s-}$ 간 오차의 제곱값이 가장 작은 값으로 선정한다.

$$idx = \arg \min_k \left((\hat{\theta}_c^{s-} - \Phi'(k))^2 \right) \quad (18)$$

$$\theta_{fin} = \Phi(idx) \quad (19)$$

이렇게 선정된 최종 방위각은 추적필터 업데이트에 사용된다.

IV. 시뮬레이션

본 장에서는 앞서 제시한 방법으로 실제 환경의 실험적 데이터에 적용시켜 성능을 확인해본다.

4.1 시뮬레이션 조건

앞서 소개한 내용들을 아래 시뮬레이션 조건 표에 요약하였다. 1, 2차에서 그룹을 짓는 과정은 레이다의 모호성처리와 빔간처리에서 수행한다고 가정하고, 본문에서는 다루지 않고 그룹화된 방위각의 선정 혹은 계산만 다룬다.

실험적 데이터는 아래 표에 요약하였다. 데이터는 레이다로 측정된 SNR이 낮은 구간의 장거리 접근 표적에 대한 데이터로 방위각이 심하게 흔들리는 데이터로 앞선 그림 2-4에서 확인한 데이터이다.

표 1. 시뮬레이션 조건

Table 1. Simulation condition

Item	Description
1 st Clustering	<ul style="list-style-type: none"> Grouping : Ambiguity solving Output : Max amplitude value
2 nd Clustering	<ul style="list-style-type: none"> Grouping : Successive dwell clustering Output : Max amplitude value
Association	Nearest Neighborhood (NN)
TWS track filter	IMM Kalman filter <ul style="list-style-type: none"> Dynamic model : CV, Singer

표 2. 실험적 데이터

Table 2. Empirical data

Item	Description
Target type	Aircraft
Range	Hundreds [km]
Azimuth	42.5~44.5 [deg]
Altitude	Around 8 [km]
Heading	Inbound
Radar mode	Search mode (Passive multi-beam)
Number of scans	1079

4.2 시뮬레이션 결과

위 조건과 데이터를 적용하였을 때 시뮬레이션 결과를 그림 9에 도시하였다. 그림 9에서 수백 킬로미터에서 접근하는 표적의 CPI plot의 방위각은 녹색, 최대신호크기 선정방식을 사용한 1차와 2차 클러스터링 결과는 파란색, 최종 제안한 방식의 결과는 붉은색으로 표시하였다. 최대 1.5도 가량 흔들리던 CPI Plot 방위각은 두 단계의 클러스터링 단계에서 흔들림이 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 최종 단계에서는 상당히 정밀한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

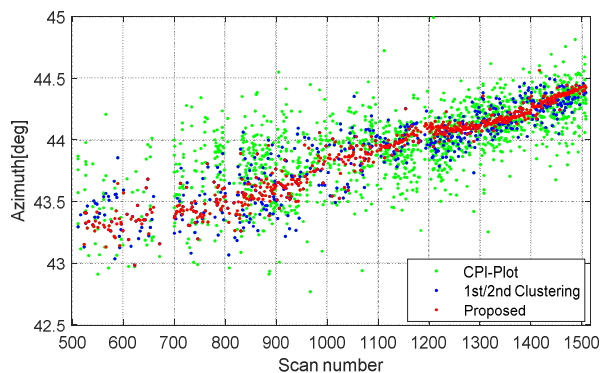


그림 9. 실험 데이터를 활용한 시뮬레이션 결과

Fig. 9. Simulated result using empirical data

정량적으로 성능을 확인하기 위해 CPI Plot, 최대 신호크기 선정방식, 무게중심 방식, 제안기법들의 방위각 표준편차를 계산하여 그림 10에 도시하였다. 실패적 데이터는 측정 당시 정확한 GPS이 제공되지 않아 전체 데이터를 최소자승법으로 커브피팅하여 기준값으로 사용하였다.

그림 10에서 각 방식의 표준편차값을 확인 할 수 있다. 방위각 표준편차 값이 소수점으로 작게 표현되어 제안된 기법의 오차저감 효과가 적어보일 수 있으나 레이더 시험평가에서 합불 판정은 소수점 단위의 작은 차이로 결정되기 때문에 오차값을 최대한 줄일 수 있어야 한다. 정규화하여 성능을 확인 할 때, 그림 11을 통해 제안한 방식이 CPI-Plot 대비 51% 수준으로 가장 오차 표준편차가 낮음이 확인 할 수 있다. 널리 사용되는 최대신호세기 선정방식과 무게중심 방식과 비교했을 때도 10~20% 가량 오차저감 효과를 확인하였다.

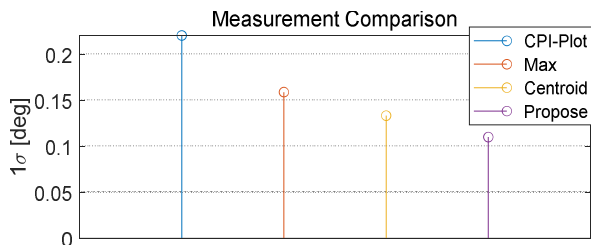


그림 10. 측정치 정밀도(표준편차) 비교
 Fig. 10. Comparison of azimuth precision (standard deviation)

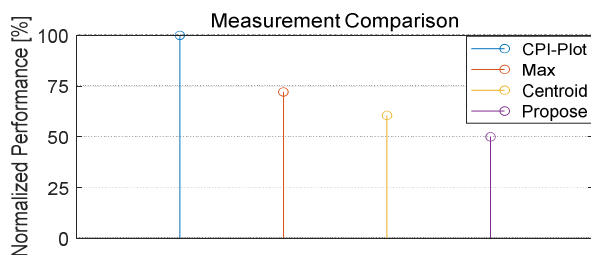


그림 11. 측정치 상대 비교
 Fig. 11. Comparison of azimuth normalized by CPI values

V. 결 론

본 논문에서는 다기능 위상배열 레이더의 수동다중빔(Passive multi-beam) 기반 탐색 표적의 방위각 저감 기법을 제안하였다. 레이더가 사용하는 파형

(예, MPRF)과 다중빔 형성에 의해 발생하는 동일표적에 대한 다수의 측정치가 발생하는 점에 착안하여, 크게 세 단계의 처리 과정을 통해 오차를 저감시켰다.

두 단계의 클러스터링 과정을 최대한 빠르게 처리하여 임시 방위각을 선정하되 모든 히스토리는 저장하였다. 임시 방위각으로 표적과 연관 시켜준 뒤, 저장된 히스토리들을 펼쳐 놓고 가장 표적레직에 가까운 값을 최종 방위각으로 선정하였다.

해당 방식은 실제 환경의 항공기 표적을 대상으로 raw data인 CPI Plot 방위각 대비 약 두 배가량 정밀한 것을 확인하였고, 널리 사용되고 있는 최대 신호크기 선정 방식과 무게중심법 대비 10~20% 가량 더 높은 오차저감 성능을 보이는 것을 확인하였다.

References

- [1] P. W. Moo and Z. Ding, "Adaptive Radar Resource Management", Academic Press, pp. 1-2, 2016. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02505-1>.
- [2] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, "Principles of modern radar", SciTech, pp. 93, 2010.
- [3] G. R. Curry, "Radar system performance modeling", Artech House, pp. 23, 2005.
- [4] D. K. Barton, "Radar Equations for Modern Radar", Artech House, pp. 143, 2013.
- [5] J. H. Lee, S. G. Lee, D. S. Park, and B. L. Cho, "Effective Beam Structure for Multi-Target Detection and Tracking in the Active Electrically Scanned Array Radar", Kjkiees, Vol. 25, No. 10, pp. 1069-1076, Oct. 2014. <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.10.1069>.
- [6] S. H. Lee, S. B. Park, and I. S. Seo, "Analysis of Bearing Error Related to Beamwidth and Fusion Tracking Filter Taking Into Account It", Journal of KIIT, Vol. 11, No. 12, pp. 105-113, 2013.
- [7] M. K. Park, W. Y. Yang, H. M. Jeon, H. W. Ko, S. W. Hong, and K. S. Kim, "Theoretical angular

accuracy for a fully digital radar", 2019 KIMST Conference, 2019.

- [8] Y. He, J. J. X, and X. Guan, "Radar Data Processing with Applications", Wiley, 2016.

저자소개

고 현 우 (Hyunwoo Ko)



2014년 8월 : 한동대학교

기계제어공학부(공학사)

2016년 8월 : 한국과학기술원

조천식녹색교통대학원(공학석사)

2017년 9월 ~ 현재 : 국방과학

연구소 연구원

관심분야 : 레이더 신호 및 데이터
처리, 표적 추적처리, 분산시스템