

도파관 슬롯 방식의 능동위상배열레이더 표적정보 오차보상기법 연구

유동길^{*,1)} · 김덕환¹⁾ · 김한생¹⁾ · 이기원¹⁾

¹⁾LIG넥스원(주) 감시정찰연구소 1팀

A Study on Waveguide Slotted Active Phased Array Radar Target Information Error Compensation Technique

Dong-gil Yoo^{*,1)} · Duck-hwan Kim¹⁾ · Han-Saeng Kim¹⁾ · Ki-Won Lee¹⁾

¹⁾Project 1 Team, Radar R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd., Korea

(Received 4 September 2018 / Revised 5 October 2018 / Accepted 9 January 2019)

ABSTRACT

The waveguide slotted active phased array radar is characterized in that the beam is tilt in a specific direction when the feeding position of the antenna is not in the center of the antenna. If the beam deflection phenomenon is not properly compensated, error bias is generated in the target information collected by the radar, and the target accuracy is lowered. In this paper, we describe a technique to compensate the error of the target information that is collected in the active phased array radar of the waveguide slot type instead of the center of the antenna.

Key Words : Radar(레이더), Beam Steering(빔조향), Error Compensation(오차보상)

1. 서론

도파관 슬롯 방식의 능동위상배열레이더는 안테나 급전 시 도파관을 진행하는 전파의 관내 파장과 도파관 외부의 자유공간에서의 파장 차이가 발생하여 각 슬롯으로 송신되는 빔의 위상이 조금씩 틀어진다.

급전부가 안테나의 중앙인 경우 안테나의 구조적 대칭성으로 인하여 안테나 양 측에서 발생한 조향 오차가 상쇄되지만 급전부가 안테나 측면인 경우 빔 지

향오차가 생기게 되어 빔이 특정방향으로 틀어지게 된다. 실제 레이더 개발 시 안테나 설계 단계에서 안테나 내부의 구성품 배치, 간격 및 각 구성품 간 상호작용을 고려하여 설계하다 보면 다양한 사유로 인해 안테나 급전을 안테나의 정중앙에서 수행하지 못하는 경우가 종종 발생하게 되는데 이러한 경우 안테나 빔 지향오차에 따른 표적정보 오차를 보상을 해주어야 한다.

만약 빔 지향오차에 의한 표적정보 오차를 제대로 보상하지 않는 경우 레이더가 수집한 표적정보에 오차 바이어스가 포함 되어 표적 정확도가 떨어지게 된다. Fig. 1~3은 안테나 급전을 안테나의 측면에서 수

* Corresponding author, E-mail: donggil.yoo@lignex1.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

행하는 도파관 슬롯 방식 선배열 능동위상배열레이더의 송신 빔 특성을 보여준다.

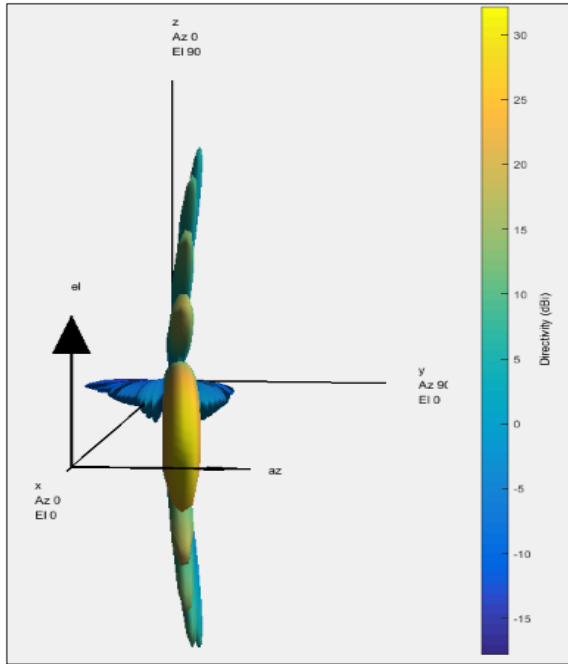


Fig. 1. An example of a waveguide slotted line array active phased array radar transceiver beam that performs power feeding from the antenna side

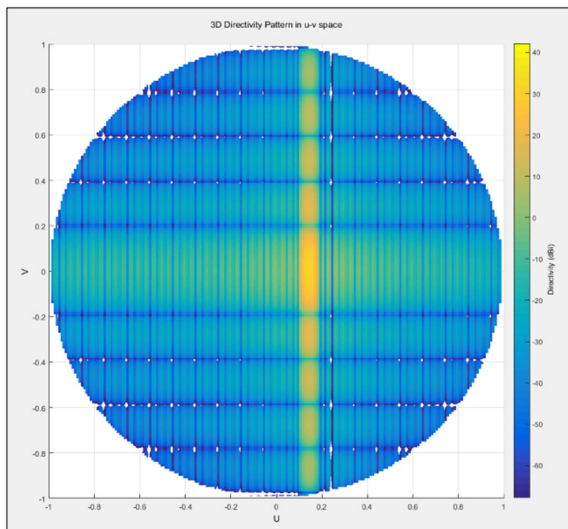


Fig. 2. An example of Tx / Rx beam(u-v domain)

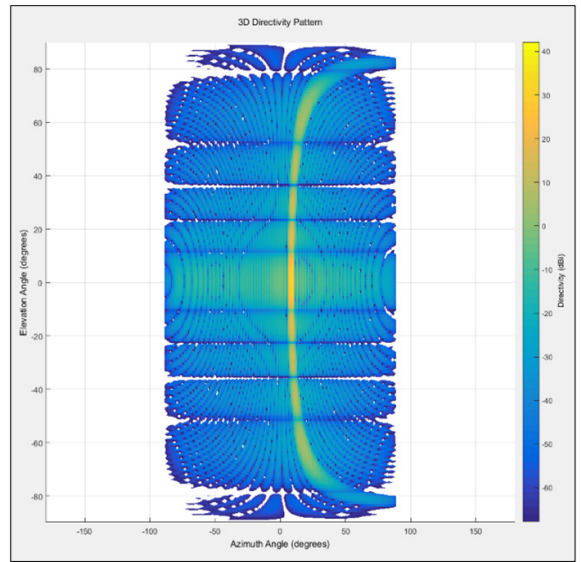


Fig. 3. An example of azimuth / elevation angle of beam steering

빔 지향오차는 급전 위치 및 사용 주파수, 도파관 슬롯간 거리 등에 따라 지향오차가 다르게 적용이 된다. 도파관 슬롯 방식 안테나의 급전 위치를 안테나 측면에서 하는 경우 Fig. 2를 보면 안테나 방위각 방향(u-v면 상에서 u축)으로 α 도 만큼 지향오차가 생긴다. u-v면에서 u축으로 일정 값만큼 지향오차가 발생하게 되면 Fig. 3처럼 선배열 안테나가 조향하는 방위각은 안테나 면 중양을 기준으로 고각의 절대 값이 커질수록 α 도보다 크게 지향오차가 발생한다. 이는 빔이 구의 형태를 띄기 때문에 Fig. 2와 같이 안테나 면에서 방위각으로 α 만큼 일괄적으로 틀어져서 빔이 나간다고 해도 실제 조향되는 빔은 Fig. 3과 같이 고각에 따라 조향되는 방위각이 달라진다. 이러한 현상은 레이더 안테나에서 수집한 표적 고각에 따라 적용되는 방위각 오차 바이어스가 달라짐을 의미하며 빔 틀어짐 현상에 대한 적절한 보상이 수행되지 않을 경우 표적정보의 정확도가 표적정보의 고각에 따라 달라짐을 의미한다.

본 논문에서는 안테나 측면에서 급전을 수행하는 도파관 슬롯 방식의 선배열 능동위상배열 레이더에서 발생하는 방위각 오차바이어스 현상에 대해 기술하고 해당 오차바이어스에 대한 보상을 표적 탐지 & 추적의 실시간성을 고려하여 신호처리 이후 획득되는 Raw 데이터를 보상하는 것보다 처리 데이터양이 가장 적

은 데이터 처리 단계(클러스터링 및 모호성제거 수행 후)에서 수행하는 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 시험을 통해 획득한 실제 표적 데이터를 이용하여 시뮬레이션한 결과를 제시함으로써 제안하는 알고리즘의 성능을 입증하였다.

2. 빔 틀어짐 현상 분석

2장에서는 도파관 슬롯 방식의 선배열 능동위상배열 레이더 안테나의 측면에서 안테나 급전을 수행하였을 때 빔 틀어짐 현상에 대한 내용을 기술한다. 먼저 빔 틀어짐 현상을 설명하기 위해 안테나 면에서 송신되는 빔에 대한 내용을 기술하고, 안테나 면에서 송신되는 빔과 빔 틀어짐 현상을 해석하기 위해서 안테나 좌표계에 대한 내용을 기술한다. 마지막으로 안테나 면에서 틀어진 빔이 실제 표적을 탐지 시 어떤 영향을 미치는지에 대한 분석내용을 기술한다.

2.1 빔 틀어짐 원인

안테나 측면에서 급전하는 도파관 방식의 선배열 능동위상배열레이더는 사용 주파수와 도파관 슬롯 간 거리, 도파관 크기에 의해 빔이 틀어지는 특징을 갖는다.

빔이 틀어지는 이유는 각 도파관 슬롯에서 송신되는 빔의 위상차 때문이며 도파관 슬롯이 일정 간격으로 형성되어 있는 경우 1번째 슬롯을 기준으로 했을 때 n번째 슬롯에서의 위상차는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\chi = (n-1) \frac{2\pi}{\lambda_g} d \quad (1)$$

위 식에서 χ 는 위상차이고, λ_g 는 관내파장, d 는 도파관 슬롯 간 거리를 의미한다.

식 (1)의 관내파장 λ_g 는 아래와 같이 계산 가능하다.

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (2)$$

식 (2)의 λ_0 는 자유공간에서의 파장이고, λ_c 는 차단 파장을 의미한다. 식 (2)의 λ_0 와 λ_c 는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (3)$$

$$\lambda_c = 2a$$

식 (3)의 c 는 빛의 속도이고, f 는 사용 주파수, a 는 도파관 크기를 의미한다.

결론적으로 안테나 측면에서 급전하는 도파관 방식의 선배열 능동위상배열레이더는 식 (1) ~ (3)과 같이 빔 송신 시 각 슬롯 별 위상차에 의해 송수신되는 빔의 방위각 조향이 틀어지게 되며 Fig. 2와 같이 U-V 면에서 빔이 한쪽으로 치우치게 된다.

2.2 안테나 좌표계

빔 틀어짐 현상을 분석하기 위해 방위-고각(Azimuth Over Elevation) 안테나 좌표계 시스템^[1]을 사용한다.

방위-고각 좌표계 시스템에서 표현되는 U , V , W 는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$U = \sin(Az)\cos(EI) \quad (4)$$

$$V = \sin(EI) \quad (5)$$

$$W = \cos(Az)\cos(EI) \quad (6)$$

식 (4) ~ (6)^[1]의 Az , EI 은 안테나 기준면에서의 방위각, 고각이며, 실제 빔이 조향하는 방위각, 고각과는 차이가 있다.

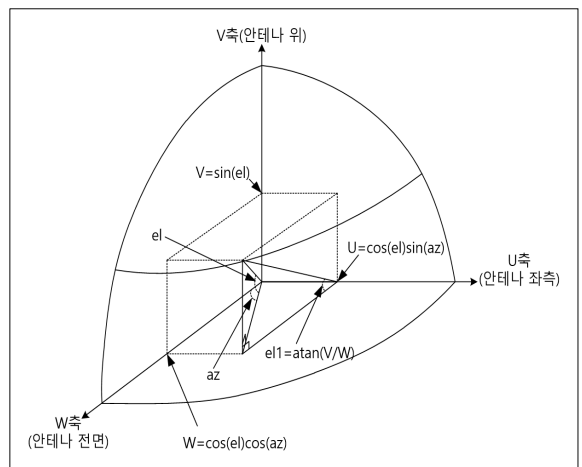


Fig. 4. Relation between azimuth, elevation and u, v, w of the antenna coordinate system

Fig. 4는 안테나 좌표계 상 방위각, 고각과 U , V , W 간 관계를 나타낸다.

2.3 빔 틀어짐에 의한 조향되는 방위각 분석

안테나면 고도 0도 기준 방위각 방향으로 각도 α 만큼 빔 지향오차가 발생한 경우, 고각 별 틀어진 표적의 방위각은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\psi = \frac{U_{temp}}{\sqrt{U^2 + W^2}} \quad (7)$$

$$U_{temp} = \sin(\alpha)\cos(0^\circ)$$

식 (7)^[1]의 ψ 는 안테나가 수집한 표적 방위각을 의미하고, U_{temp} 는 U , V , W 좌표계에서 고각이 0도일 경우에 대한 U 값이다. 식 (7)을 이용하여 고각에 따른 틀어진 방위각을 도시하면 Fig. 5와 같다.(안테나 기준 고각 0도에서 빔이 방위각 8도를 조향한다고 가정)

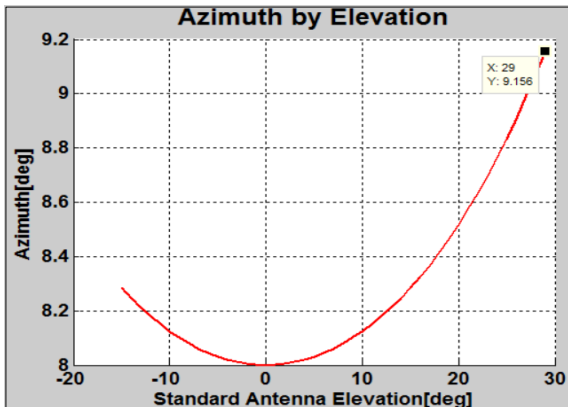


Fig. 5. Change of azimuth by elevation angle(azimuth 8 degree steering)

Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 안테나 측면에서 급전하는 도파관 슬롯 방식의 능동위상배열 안테나는 빔 송신 시 방위각 방향으로 빔 지향오차가 생기며 고각의 절대값이 커질수록 방위각 방향으로 빔이 더 많이 틀어짐을 알 수 있다. 또한 고각 0도와 30도에서의 조향되는 방위각을 비교했을 때 1도 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

방위각 1도는 원거리 표적의 경우 무시할 수 없는 오차기 때문에 오차 보상을 하지 않는 경우 표적 정확도에 문제가 있을 수 있다.

3. 방위각 오차 보상 알고리즘

앞서 2장에서 방위각 오차바이어스의 원인 및 현상을 분석하였고, 이를 토대로 3장에서는 도파관 슬롯 방식의 선배열 능동위상배열레이더가 수집하는 표적 정보에 영향을 주는 방위각 오차바이어스를 보상하는 알고리즘에 대해 기술한다.

각 도파관 슬롯에서 송신되는 빔 간 위상 차이에 의한 방위각 오차바이어스는 표적의 고각에 따라 바이어스 크기가 달라지며 이를 보상하기 위해서는 먼저 레이더에서 수집한 표적 정보(방위각: ψ , 고각: θ)와 안테나면 기준 고각 0도로 빔 송수신 시 적용되는 방위각 오차바이어스 ψ_e 값을 이용한다.

방위각 오차바이어스 ψ_e 와 안테나에서 수집한 표적 고각 θ 를 식 (4) ~ (6)에 대입하여 안테나 면 기준 U , V , W 값으로 아래와 같이 변환한다.

$$U = \sin(\psi_e)\cos(\theta)$$

$$V = \sin(\theta) \quad (8)$$

$$W = \cos(\psi_e)\cos(\theta)$$

변환된 U , V , W 값을 식 (7)에 대입하여 안테나 기준 조향된 방위각 ψ_s 를 아래와 같이 계산한다.

$$\psi_s = \frac{U_{temp}}{\sqrt{U^2 + W^2}} \quad (9)$$

$$U_{temp} = \sin(\psi_e)\cos(0^\circ)$$

안테나에서 수집한 표적 방위각 ψ 와 식 (9)에서 계산한 조향 방위각 ψ_s 를 이용하여 최종 보상된 방위각 ψ_n 을 아래와 같이 계산한다.

$$\psi_n = \psi \pm \psi_s \quad (10)$$

식 (10)에서 \pm 는 표적 방위각 ψ 의 기준 방향과 안테나 급전이 안테나의 오른쪽인지 왼쪽인지를 고려하여 적용한다.

4. 시뮬레이션 구성 및 결과

본 논문에서 제안한 오차바이어스 보상 알고리즘을

입증하기 위해 레이더 시험 시 저장해놓았던 실제 표적정보가 담긴 로그데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 로그데이터를 수집한 레이더는 본 논문에서 기술한 것과 동일한 안테나 측면에서 급전하는 도파관 슬롯 방식의 선배열 능동위상배열 레이더로써 제안하는 알고리즘을 입증하기 위한 목적으로만 로그데이터를 이용한다. 식 (1)을 본 레이더에 적용하여 방위각 오차바이어스를 분석한 결과 안테나면 기준으로 고도 0도일 때 방위각으로 약 6도 정도 빔이 틀어짐을 확인하였다. 로그데이터는 주레이더 플롯(PSR : Primary Surveillance Radar)과 피아식별 레이더 플롯(SSR : Secondary Surveillance Radar)로 구성되어 있으며 SSR은 도파관 슬롯 방식의 안테나가 아닌 피아식별레이더의 개별 안테나로 수집하여 표적 정보에 대한 오차는 매우 적다. PSR의 경우 표적에 대한 플롯과 허위 플롯이 존재하며, PSR 플롯 정확도는 거리 25 m, 방위각 0.4도, 고각 0.4도 정도 오차편차가 존재한다.

4.1 시뮬레이션 구성

로그데이터의 PSR에는 클러터가 다수 포함되어 있기 때문에 추적시스템에 로그데이터를 입력으로 사용하여 표적 추적을 수행함으로써 클러터를 제거하고, 추적에 사용된 PSR과 SSR의 방위각 오차바이어스를 분석하여 시뮬레이션 결과로 도출하였다.

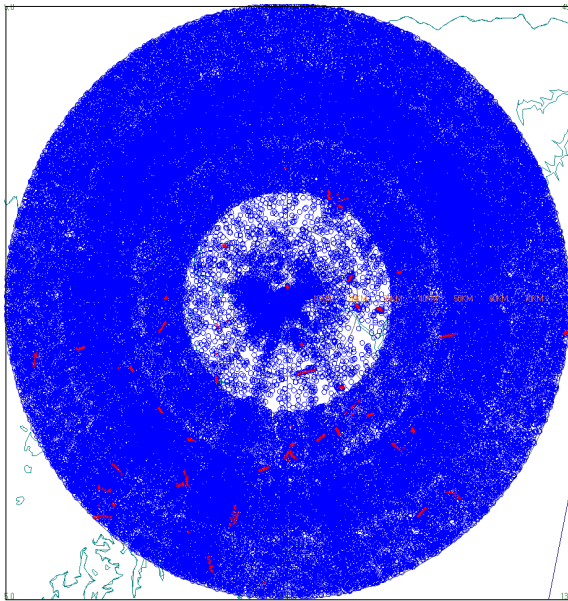


Fig. 6. Log data PPI screen(accumulated 10 scans)

Fig. 6은 시뮬레이션에 사용되는 로그데이터의 샘플을 보여주는 그림이다. 파란색은 PSR, 빨간색은 SSR 정보이고 총 1000스캔 중 10스캔만 누적하여 도시한 화면이다. PSR의 90 % 이상이 클러터 정보이기 때문에 10스캔만 누적하여도 화면을 클러터로 가득 채우는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 7, 8은 로그데이터에 포함되어있는 수많은 표적 정보 중 본 논문에서 분석할 표적 정보(거리-방위각 전시, 거리-고도 전시)만을 도시한 그림이다. 해당 표적 정보는 로그데이터에 포함되어 있는 수많은 표적 정보 중 레이더 기준으로 표적 이동 시 표적의 고각과 방위각 범위가 가장 다양한 정보를 선택하였다.

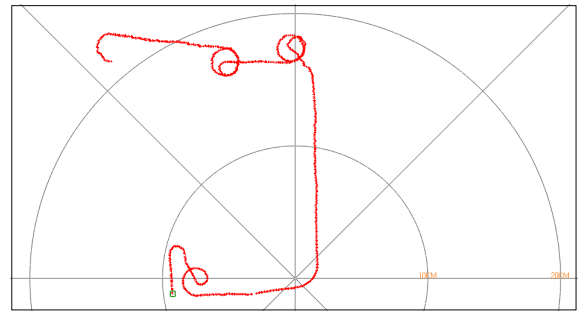


Fig. 7. Target information to be analyzed(PPI)

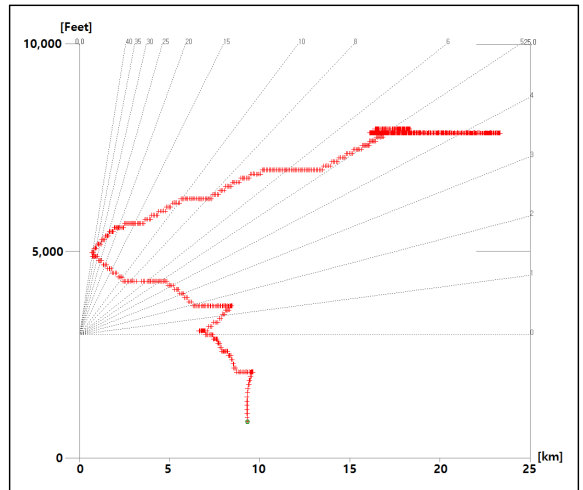


Fig. 8. Target information to be analyzed(RHI)

본 논문에서 분석할 표적정보는 약 40 m/s의 속력으로 진북을 기준하여 시계방향으로 방위각 약 270도, 거리 약 10 km에서 비행을 시작하여 레이더 방향으로

접근 후 북쪽으로 퇴각하는 시나리오로 비행하였다. 표적은 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 전 방위에 걸쳐서 비행하였으며 고각은 비행 시작 시 약 4도로 시작하여 레이더 접근 시 최대 41도까지 증가하였다가 레이더에서 멀어질수록 고각이 점차 감소하여 데이터 마지막에는 고각 4도까지 감소한다.

본 논문에서 사용한 추적 시스템 관련 정보는 Table 1과 같다.

Table 1. Tracker system information

Tracking Filter	2 model IMM Filter
Dynamic Model	CV(Constant Velocity) , Singer
Association Algorithm	PDA (Probability Data Association)
Track Initiation	Two Point Initiation
Track Status	$X = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z}]^T$ (3axis :position, velocity, accel)
PSR, SSR Status	$Z = [r \ \psi \ \theta]^T$ (range, azimuth, elevation)

시뮬레이션에 사용한 추적필터는 2개의 동역학 모델^[2,3]을 이용한 IMM(Interacting Multiple Model)^[4] 필터를 사용하였다. 각 동역학 별 필터는 추적 상태변수와 플롯(PSR, SSR)의 위치 정보가 서로 선형이지 않으므로 EKF(Extended Kalman Filter)^[5] 방식으로 Track Update를 수행한다.

항적연관 알고리즘은 PDA^[6] 방식을 이용하여 트랙 유효게이트에 존재하는 모든 플롯을 사용하여 트랙을 갱신한다. 트랙 초기화는 연속된 스캔에서 수집한 두 개의 플롯으로 트랙을 생성하는 Two Point Initiation 알고리즘^[7]을 사용한다.

본 논문에서 수행하는 오차보상 및 표적추적 시뮬레이션 흐름도를 도시하면 Fig. 9와 같다.

Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 로그데이터의 PSR은 본 논문에서 제안하는 방위각 오차보상을 수행하여 추적 시스템의 입력으로 들어가고 SSR은 별다른 보상 없이 입력으로 들어간다. 추적시스템에서는 입력받은 PSR, SSR을 이용하여 추적정보와 연관을 수행한다.

연관이 되지 않는 경우 해당 PSR, SSR과 이전 스캔에서 연관되지 않은 PSR, SSR을 이용하여 추적정보를 생성한다. 추적 정보 생성에 사용되지 않은 PSR, SSR

은 다음스캔에서 추적 정보생성에 사용하기 위해 저장한다.

연관이 된 PSR과 SSR은 연관된 트랙의 갱신에 사용되고, 트랙 관리 수행 후 최종 출력 데이터로 저장한다. 갱신이 된 트랙은 다음 스캔에서 PSR, SSR과 연관을 위해 예측을 수행한다.

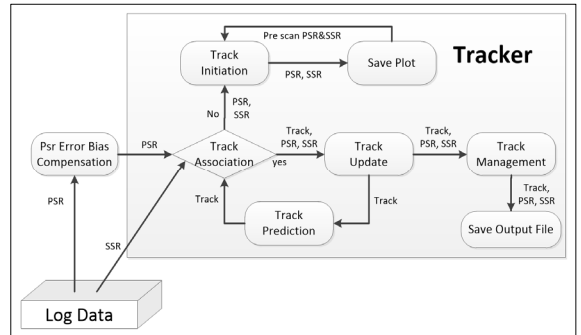


Fig. 9. Error compensation and target tracking simulation flowchart

4.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과는 시뮬레이션 1, 2, 3의 결과를 비교 분석하여 제시하며 시뮬레이션 1, 2, 3에 대한 내용은 Table 2와 같다.

Table 2. Simulation information(Compensation algorithm)

Simulation #n	Compensation 1	Compensation 2
1	X	X
2	O	X
3(Proposal)	O	O
Compensation 1 : 안테나 기준 고각 0도에서 틀어지는 방위각 조향값 보상 Compensation 2 : 안테나 기준 고각에 따라 변화하는 방위각 오차 보상		

Table 2에서 확인할 수 있듯이 안테나 측면에서 안테나 급전 시 도파관 슬롯 방식에 의해 물리적으로 빔이 틀어지는 현상을 보상하기 위해 두 개의 보상 알고리즘으로 구분했고, 제안하는 알고리즘의 성능을 입증하기 위하여 두 개의 보상 알고리즘을 수행하기 전과 후를 비교하였다.

먼저 두 보상 알고리즘을 모두 적용하지 않은 시뮬레이션 1의 결과는 Fig. 10과 같다.

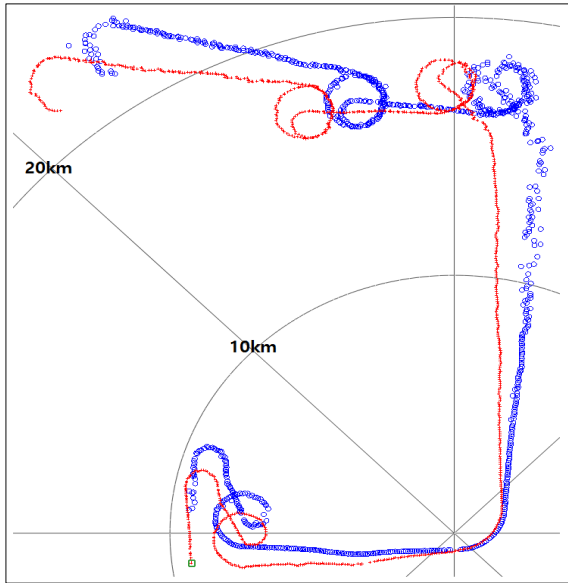


Fig. 10. Result of simulation 1 (No compensation algorithm applied)

Fig. 10은 아무런 오차보상을 수행하지 않은 경우의 시뮬레이션 결과로써 빨간색은 SSR, 파란색은 PSR 정보이다. 빔 틀어짐에 대한 보상을 하지 않았으므로 SSR과 PSR 간 방위각 오차바이어스가 존재함을 확인할 수 있다.

시뮬레이션 1의 방위각 오차바이어스를 분석해보면 Fig. 11과 같다.

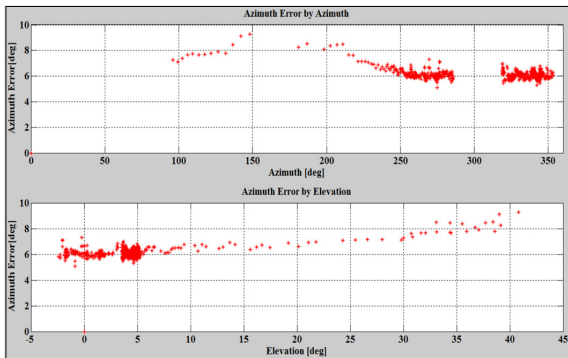


Fig. 11. Result of simulation 1 azimuth error analysis (No compensation algorithm applied)

Fig. 11은 시뮬레이션 1의 방위각 오차를 분석한 결과로써 아무런 보상을 하지 않은 경우 평균적으로 약 6도의 방위각 오차바이어스가 존재함을 확인할 수 있다.

Fig. 12 ~ 13은 Compensation 1, 2 중 Compensation 1 알고리즘만 적용하여 방위각 오차를 보정한 시뮬레이션 2에 대한 결과 및 방위각 오차분석 결과를 도시한 그림이다.

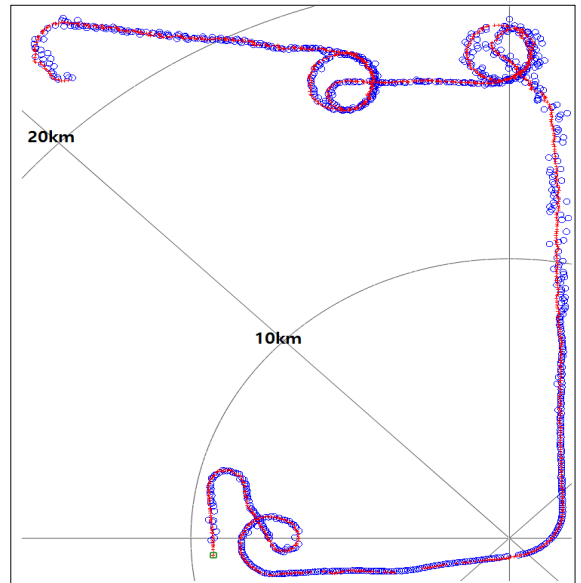


Fig. 12. Result of simulation 2 (Compensation 1 applied)

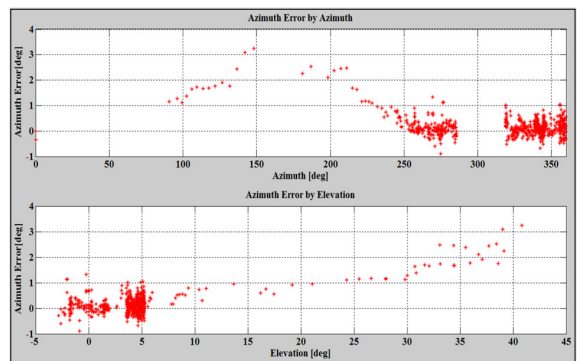


Fig. 13. Result of simulation 2 azimuth error analysis (Compensation 1 applied)

Fig. 12와 13은 시뮬레이션 2의 결과 및 방위각 오차 분석 결과로써 시뮬레이션 1 결과와 비교했을 때

방위각에 대한 오차바이어스가 많이 보상되었음을 확인할 수 있다. 다만, 표적 고각이 상승할수록 방위각 오차가 심해짐을 확인할 수 있다.

Fig. 14 ~ 15는 Compensation 1, 2 모두를 보정한 시뮬레이션 3에 대한 결과 및 방위각 오차분석 결과를 도시한 그림이다.

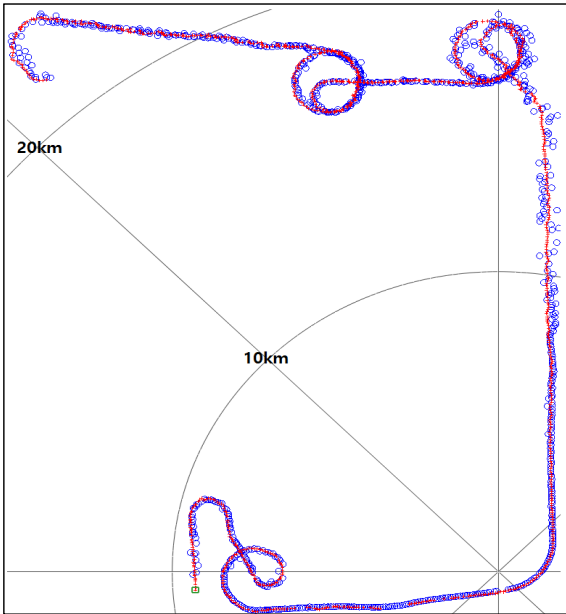


Fig. 14. Result of simulation 3(Compensation 1 & 2 applied)

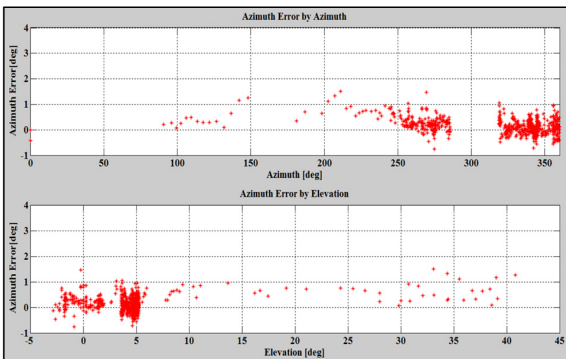


Fig. 15. Result of simulation 3 azimuth error analysis (Compensation 1 & 2 applied)

Fig 14와 15는 시뮬레이션 3의 결과 및 방위각 오차 분석 결과로써 시뮬레이션 1 결과와 비교했을 때

방위각에 대한 오차바이어스가 많이 보상되었음을 확인할 수 있다. 또한, 시뮬레이션 2, 3의 방위각 오차 분석 결과 비교 시 표적 고각이 상승함에 따라 방위각 오차가 심해졌던 시뮬레이션 2에 비해 시뮬레이션 3에서는 표적 고각이 상승함에 따라 심해졌던 방위각 오차가 많이 개선됨을 확인할 수 있다.

위 시뮬레이션 1 ~ 3의 결과로 도파관 슬롯 방식의 선배열 능동위상배열레이더의 방위각 오차바이어스를 개선하기 위해서는 Table 2에서 제시한 2개의 오차보상이 필요함을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 도파관 슬롯 방식의 선배열 능동위상배열레이더의 안테나 측면 급전 시 도파관 슬롯 간에 발생하는 위상차 때문에 방위각 오차바이어스가 생기는 현상에 대하여 기술하였고, 안테나가 빔을 송신하는 전 영역에 동일한 오차가 발생하는 것이 아니라 안테나 중앙으로부터 고각의 절대 값이 높아질수록 오차바이어스가 증가함을 기술하였다. 또한 이러한 현상을 해결하기 위해 안테나 정면에서 발생하는 오차바이어스로 고각에 따른 오차바이어스를 산출하는 알고리즘을 제안하였으며, 레이더 표적 탐지 & 추적의 실시간성을 고려하여 신호처리 이후 Raw 데이터를 보상하기 보다는 클러스터링 및 모호성제거를 수행한 이후 데이터를 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 마지막으로 실제 도파관 슬롯 방식의 선배열 능동위상배열레이더에서 수집한 표적 정보 로그데이터를 입력으로 한 시뮬레이션을 통해 제안하는 알고리즘의 기능 및 성능을 확인하였다.

References

- [1] Gregory F. Masters, Stuart F. Gregson, "Coordinate System Plotting for Antenna Measurement," AMTA 2007; 29th Antenna Measurement Techniques Association, pp. 449-458, 2007.
- [2] X. Rong Li and Vesselin P. Jilkov, "Survey of Maneuvering Target Tracking. Part 1 : Dynamic Models," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39 No. 4 pp. 1333-1364,

- Oct. 2003.
- [3] Singer R. A., "Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Target," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 6 No. 4 pp. 473-483, 1970.
- [4] Lerro D. and Bar-Shalom Y., "Interacting Multiple Model Tracking with Target Amplitude Feature," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 29, pp. 494-509, Apr. 1993.
- [5] L. Ljung, "Asymptotic Behavior of the Extended Kalman Filter as a Parameter Estimator for Linear System," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 24 Issue: 1 pp. 36-50, Feb. 1979.
- [6] Y. Bar-Shalom, F. Daum and J. Huang, "The Probability Data Association Filter," IEEE Control System, Vol. 29 Issue: 6, Nov. 2009.
- [7] Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann, "Tracking and Data Association," Academic Press, New York, 1988.