

## 항공용 안테나 하이브리드 모노펄스 레이다 시스템의 실용적 표적 방위각 추정 방법

### Practical Method to Extract Azimuth Angle of Target for Air-Borne Antenna Hybrid Mono-Pulse Radar System

김진우<sup>1</sup> · 윤재혁<sup>1</sup> · 노수현<sup>1</sup> · 이종은<sup>1</sup> · 전영범<sup>1</sup> · 옥재우<sup>1</sup> · 유응노<sup>2</sup> · 윤상호<sup>\*3</sup> · 신현익<sup>\*2</sup>

Jin-Woo Kim<sup>1</sup> · Jae-Hyuk Youn<sup>1</sup> · Soo-Hyun Rho<sup>1</sup> · Jong-Eun Lee<sup>1</sup> · Yeong-Beom Jeon<sup>1</sup> ·  
Jae-Woo Ok<sup>1</sup> · Eung-Noh You<sup>2</sup> · Sang-Ho Yoon<sup>\*3</sup> · Hyun-Ik Shin<sup>\*2</sup>

#### 요 약

항공용 안테나 하이브리드 모노펄스 레이다 시스템을 이용하여 지상 이동표적 탐지 시, 표적의 방위각 정확도는 시스템 내 채널 간 위상 불균형에 따른 모노펄스 기율기 추정 정확도에 지배적으로 영향을 받는다. 본 논문에서는 안테나와 180도 하이브리드의 물리적 길이 차이에 의한 위상 불균형을 효과적으로 보상할 수 있는 방법을 제안 하였다. 비행시험을 통하여 제안된 방법의 성능을 검증한 결과, 보상 전보다 유의한 성능개선 효과를 확인할 수 있었다.

#### Abstract

The accuracy of extracting the azimuth angle of a target is significantly affected by the error in the mono-pulse ratio of the air-borne antenna hybrid mono-pulse Radar system. This error is strongly induced by the phase imbalance between the channels of the system. In this paper, a method is proposed for effectively calibrating the phase imbalance caused by physical differences between the RF channels from the antenna to the 180° hybrid. Through a flight test, it was confirmed that the accuracy of the azimuth angle of the target is improved by using the proposed method.

Key words: Target Azimuth Angle, Mono-Pulse Ratio, Phase Imbalance, Antenna, 180° Hybrid

#### I. 서 론

지상 이동표적의 탐지를 위하여 모노펄스 레이다 시스템은 일반화된 시스템이다<sup>[1]</sup>. 이 시스템에 사용될 수 있는 다양한 안테나 구조들 중에서 도파관 슬롯 배열 2채널 안테나 구조는 물리적으로 견고성이 뛰어나고, 고출력 송신

이 가능하여 항공용 레이다 시스템에서 많이 사용된다<sup>[2]</sup>. 모노펄스 기능을 구현하기 위해서는 이 안테나로부터 수신된 2채널 이상의 수신신호를 합성하여 합 및 차 채널 신호를 생성한다. 수신신호의 합성은 채널 1과 채널 2 사이의 위상차가 180도 차이가 나도록 설계된 부품(180도 하이브리드)을 사용한다<sup>[2],[3]</sup>. 180도 하이브리드와 슬롯

LIG 넥스원(LIG NEX1)

\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

1: 선임연구원, 2: 수석연구원, 3: 책임연구원

· Manuscript received July 1, 2018 ; Revised August 7, 2018 ; Accepted August 13, 2018. (ID No. 20180701-069)

· Corresponding Author: Jin-Woo Kim (e-mail: modone79@gmail.com)

배열 안테나는 도파관 구조로 결합하여 제작 효율성을 높일 수 있다. 본 논문에서는 이러한 구조의 모노펄스 레이더 시스템을 “안테나 하이브리드 모노펄스 레이더 시스템”이라고 명명하고자 한다.

일반적으로 모노펄스 시스템에서 표적의 위치는 방위각 정보로 나타낸다. 시스템의 안테나 지향각 정보에 오차가 없다고 가정한다면, RF 신호 관점에서 표적의 방위각 정확도는 시스템 내 합과 차 채널 수신신호 사이의 위상 불균형 정도에 의하여 결정된다. 이 위상 불균형은 시스템의 모노펄스 기울기를 변화시켜 방위각 오차를 유발한다<sup>[4]</sup>. 따라서, 채널 간 수신신호의 위상교정을 통하여 표적의 방위각 정확도를 향상시킬 수 있다.

안테나 하이브리드 모노펄스 레이더 시스템은 안테나, 180도 하이브리드, 그리고 RF 송·수신기로 세분화하여 채널 간 수신신호의 위상교정을 수행할 수 있다. RF 송·수신기는 능·수동 소자들이 결합되어 있어 위상교정의 절차가 복잡할 수 있지만, 설계에 따라 자체 Loop-back 신호를 송·수신하여 실시간으로 위상교정을 수행할 수 있다. 반면에 안테나와 180도 하이브리드는 수신경로의 물리적 길이 차이에 의해 채널 간 수신신호의 위상 불균형이 발생한다. 대부분의 경우, 위상 불균형 해소를 위하여 안테나와 180도 하이브리드 사이의 경로 보상값을 추출하고, 신호처리 시 보상하여 이상적인 모노펄스 기울기로부터 표적의 방위각 정보를 추출한다<sup>[3]</sup>. 다만, 경로 보상값을 추출하기 위한 시험 및 분석에 많은 시간과 비용이 소요되는 단점이 있다.

본 논문에서는 항공용 안테나 하이브리드 모노펄스 레이더 시스템에서 안테나와 180도 하이브리드의 채널 간 수신신호의 위상 불균형을 실용적으로 보정할 수 있는 방법을 제안하였다. II 장에서는 본 논문에서 제안한 위상 불균형 보정방법을 설명하였다. III 장에서는 실험 비행시험을 통하여 제안방법의 효과를 검증하였고, IV 장에서는 결론으로 마무리하였다.

## II. 방 법

### 2-1 표적의 방위각 정보 추출

그림 1은 안테나 하이브리드 모노펄스 레이더 시스템의

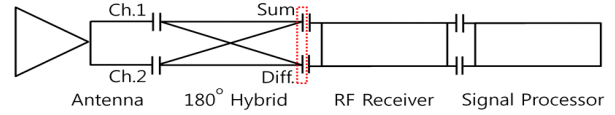


그림 1. 안테나 하이브리드 모노펄스 레이더 시스템의 RF 경로 다이어그램

Fig. 1. RF path block diagram of antenna hybrid mono-pulse Radar system.

RF 경로에 대한 블록 다이어그램이다. 채널 1과 2의 수신신호가 180도 하이브리드에서 합과 차 채널 신호로 합성되는 구조이다. 안테나와 180도 하이브리드에서 물리적 경로 차이에 의한 채널 간 수신신호의 위상 불균형이 존재하지 않는다면 180도 하이브리드 출력단(빨간색 점선박스) 합과 차 채널 수신신호 사이의 위상차는 0도이다.

이론적으로 표적으로부터 수신된 신호가 안테나 기준 방향(bore-sight) 대비 방위방향으로  $\delta$ 도 떨어져 있으면 합과 차 채널 수신신호 사이의 위상차( $\phi$ )가 발생한다(그림 2(a)). 이 위상차는 다음과 같이 계산된다<sup>[5]</sup>.

$$\phi = \frac{\pi}{\lambda} d \sin(\delta) \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 파장이고,  $d$ 는 채널 1과 채널 2 중심 사이의 거리를 나타낸다. 다음으로 식 (1)에서 계산된 위상차에 따른 합 ( $\Sigma$ )과 차 ( $\Delta$ ) 채널 수신신호 사이의 모노펄스 기울기는 아래와 같이 계산된다<sup>[5]</sup>.

$$\frac{|\Delta|}{|\Sigma|} = \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2)$$

표적의 절대적 방위각 정보는 그림 2(b)에서 설명된 기존 방법의 절차대로 추출한다. 우선, 물리적인 채널 간 경로 차이가 발생하지 않도록 보정한 다음, 합과 차 채널 수신신호로부터 모노펄스 기울기를 계산하고, 식 (2)로부터 위상차를 계산한다. 다음으로 식 (1)로부터 안테나 기준 방향 대비 상대적 표적의 방위각 정보( $\delta$ )를 추출한다. 최종적으로 안테나 지향각 정보와 합성하여 표적의 절대적 방위각 정보를 추출한다.

### 2-2 실용적 모노펄스 기울기 정보 추출

서론에서 언급한 바와 같이, 표적의 방위각 정확도는

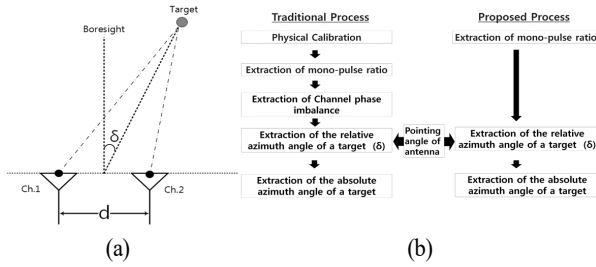


그림 2. (a) 모노펄스 시스템의 표적 방위각 모식도, (b) 표적 방위각 추출절차

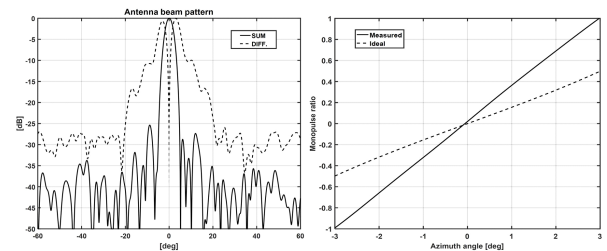
Fig. 2. (a) Diagram of target azimuth angle for mono-pulse system, (b) Extraction procedure of target azimuth angle.

모노펄스 기울기의 정확도에 의하여 결정된다. 그리고 시스템 내 합과 차 채널 수신신호의 채널 간 위상 불균형을 해소해야지만 이상적인 모노펄스 기울기 정보를 추출할 수 있다. 본 논문에서는 그림 1의 RF 송·수신기 내 채널 간 수신신호의 위상교정은 loop-back 신호를 통하여 실시간으로 정확히 수행할 수 있도록 설계하였다. 따라서, 안테나와 180도 하이브리드 내 합과 차 채널 수신신호 사이의 위상 불균형을 해소하기 위한 방법에 초점을 두었다.

일반적으로 모노펄스용 안테나와 180도 하이브리드가 제작되면 빔 성능검증을 위하여 무 방향성 챔버 시험시설에서 근접전계(near-field test) 시험을 수행한다. 측정결과와는 원전계(far-field) 패턴으로 변환하여 합과 차 채널 수신신호의 빔 패턴을 획득한다. 그림 3은 본 논문에서 사용한 안테나 하이브리드 모노펄스 시스템의 근접전계 시험 결과이다. 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이, 합과 차 채널 수신신호의 빔패턴(수신이득)이 안정적으로 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 합과 차 채널 수신신호로부터 모노펄스 기울기를 추출한 결과, 시스템 설계상의 이상적인 모노펄스 기울기(안테나 3 dB 빔폭 내)와 차이가 존재하였다(그림 3(b)). 이는 안테나에서 180도 하이브리드까지 채널 간 물리적 길이 차이에 의하여 합과 차 채널 수신신호 사이에 위상 불균형이 존재하기 때문이다. 이를 해소하기 위해서는 채널 간 수신경로의 물리적 길이가 같도록 기계적인 조정이 필요하다. 기계적인 조정은 합과 차 채널 사이의 물리적 길이 차이만큼 도파관 튜닝

블록을 정밀하게 제작하여 180도 하이브리드 합 또는 차 채널 출력단에 결합한 후, 위에서 설명한 근접전계 시험 및 모노펄스 기울기 추출 작업을 반복하면서 이상적인 모노펄스 기울기가 획득될 때까지 교정하는 방법이 있다. 하지만 이는 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에, 경로 보상값을 추출하여 신호처리 시 보상하는 방법이 일반적이다. 이는 근접전계 측정결과로부터 합 또는 차 채널 수신신호의 위상값을 조절하면서 이상적인 모노펄스 기울기와 최적화된 위상 조정값을 추출하여 신호처리 시 보상하는 방법이다.

하지만, 채널 간 물리적 경로 차이에 의한 위상 불균형은 다른 위상 불균형을 유발하는 인자(예: 온도, 습도, 전력 차)와는 달리 항상 고정적으로 동일한 위상 불균형을 유발하는 인자이다. 따라서, 그림 3(b)의 근접전계에서 측정된 모노펄스 기울기가 비록 이상적인 값과 차이가 나더라도 이로부터 안테나 기준방향 대비 표적의 상대적 방위각 정보( $\delta$ )를 추출하는 것이 가능하다. 본 논문에서는 측정된 모노펄스 기울기의 1차 fitting 계수(식 (3))를 추출하여 신호처리 시, 모노펄스 기울기로부터 직접  $\delta$ 를 추출하였다. 이 방법은 그림 2(b)의 제안방법의 절차에서 보는 바와 같이, 안테나 및 180도 하이브리드의 물리적 채널 간 길이를 보정할 필요없이 기존 계획되어 있는 근접전계 시험만으로도  $\delta$ 를 정확하게 추출할 수 있기 때문에 이동표적의 처리 절차를 간소화 할 수 있는 장점이 있다.



(a) 안테나 빔패턴(실선: 합 채널, 점선: 차 채널)  
(a) Antenna beam pattern(real line: Sum channel, dotted line: Diff. channel.)  
(b) 모노펄스 기울기(실선: 측정결과, 점선: 이상적 경우)  
(b) Mono-pulse ratio(real line: measured, dotted line: ideal case)

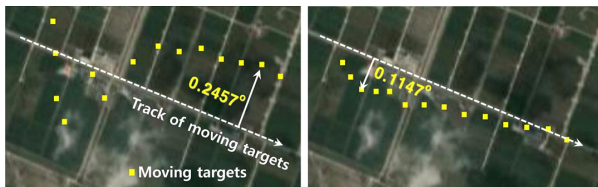
그림 3. 근접전계 시험 결과  
Fig. 3. Results of near-field test.

$$\frac{|\Delta_{measured}|}{|\Sigma_{measured}|} = a \cdot \delta + b \quad (3)$$

### III. 성능 검증

본 논문에선 비행시험을 통하여 제안된 보상방법의 성능을 검증하였다. 비행시험에 대한 자세한 정보는 참고문헌 [6]에서 참고할 수 있다.

그림 4는 비행시험 후 측정된 이동표적의 방위각 정보를 보여준다. 그림 4(a)는 안테나와 180도 하이브리드의 물리적 길이 차이에 의한 채널 간 수신신호의 위상 불균형을 보상하지 않고 획득된 결과이다. 오차가 가장 클 때 획득된 표적의 방위각 정보와 실제 방위각 정보의 차이는 약 0.2457도이다. 또한, 탐지된 이동표적 각각의 위치가 균일하지 않고 불규칙적으로 차이를 보였다. 반면에 그림 4(b)는 본 논문에서 제안한 방법으로 채널 간 수신신호의 위상 불균형을 보상한 결과이다. 보상 전과는 달리 탐지된 이동표적 각각의 위치가 규칙적으로 정렬되어 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 오차가 가장 클 때 획득된 표적의 방위각 정보와 실제 방위각 정보의 차이는 약 0.1147도이다. 이 결과는 제안된 보상방법을 이용하여 표적의 방위각 정보 추출 정확도를 충분히 개선할 수 있음을 보여준다.



(a) 보상 전 (b) 제안된 보상방법 적용 후  
(a) Prior to compensation (b) After proposed compensation

그림 4. 자체비행시험 지상이동표적 탐지 결과

Fig. 4. Results of GMTI for flight test.

### IV. 결 론

본 논문은 항공용 안테나 하이브리드 모노펄스 시스템에서 채널 간 수신신호의 위상 불균형을 효과적으로 보상할 수 있는 방법에 대하여 설명하였다. 특히, 안테나와 180도 하이브리드의 채널 간 물리적 길이 차이에 의하여 발생할 수 있는 수신신호의 위상 불균형을 효과적으로 보상할 수 있는 방법을 제안하였다. 성능검증용 비행시험을 통하여 제안된 보상방법이 이동표적의 방위각 정확도를 유의하게 보상할 수 있음을 확인하였다.

### References

- [1] S. M. Sherman, D. K. Barton, *Monopulse Principles and Techniques*, 2<sup>nd</sup> ed. Artech House, pp. 1-16, 2011.
- [2] 백종균, 정채현, 이국주, 박창현, "딥 브레이징 제작 기법을 이용한 밀리미터파 탐색기용 도파관 광벽 슬롯 배열 모노펄스 안테나," 한국전자과학회논문지, 26(11), pp. 1020-1026, 2015년 11월.
- [3] 권용욱, 윤재복, 유우성, 장현순, 김도열, "모노펄스 정확도를 위한 능동배열위상레이다의 근접전계 수신 시험 표본 주파수 채널 선택에 대한 연구," 한국전자과학회논문지, 28(4), pp. 318-327, 2017년 4월.
- [4] 김소수, 염경환, "주파수 가변 비동기 모노펄스 시스템의 모노펄스 기울기 교정," 한국전자과학회논문지, 18(11), pp. 1299-1308, 2007년 11월.
- [5] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, 2nd ed. New York, Chapman & Hall/CRC, 2005.
- [6] 신현익, 권경일, 윤상호, 김형석, 황정훈, 고영창, 유응노, 김진우, "실시간 영상형성 및 원시데이터 획득용 SAR 테스트 베드," 한국군사과학기술학회지, 20(2), pp. 181-186, 2017년.