

# F-16 전투기 축소모델을 사용한 위상비교 방향 탐지 기법의 방위각 정확도 시험

임중수<sup>1\*</sup>, 채규수<sup>1</sup>, 김영호<sup>1</sup>, 김기출<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>백석대학교 정보통신학부, <sup>2</sup>국방과학연구소

## Azimuth Accuracy Test of Phase Comparison Direction Finding Method Using F-16 Fighter Scale-down Model

Joong-Soo Lim<sup>1\*</sup>, Gyoo-Soo Chae<sup>1</sup>, Young-Ho Kim<sup>1</sup>, Kichul Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Information Communication Eng., Baekseok University

<sup>2</sup>Agency for Defense Development

**요약** 본 논문은 F-16 전투기 축소모델을 사용한 위상비교 방향 탐지 장치의 방위각 정확도 시험에 대해서 기술하였다. 전투기 하부면에 안테나를 배치하면 항공기 구조물에 의한 전파 반사가 일어나서 방위각 측정오차가 발생한다. 본 연구에서는 F-16 전투기를 5:1로 축소 모델링하고 전투기 하부면에 5개 안테나를 원형으로 설치한 다음 0-360° 방위각에서 1° 간격으로 전파를 수신하였다. 이 때 5개 안테나에 수신되는 전파의 위상을 수치해석으로 계산하여 방향 탐지정확도 시험을 실시하였다. 축소모델을 사용해서 시험한 위상비교 방향 탐지 방식의 방위각 오차는 신호잡음세기가 0dB 이상인 경우 평균 0.5° 이하로 측정되어서 전투기의 위상비교 방향 탐지 장치 설계에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**키워드** : 위상비교, 방향탐지, 원형배열, 융합, 축소모델

**Abstract** This paper describes the azimuth accuracy test of phase comparison direction finding method using F-16 fighter scale-down model. When the antennas are placed on the bottom of a fighter, reflection signals caused by an aircraft structure arises and an azimuth error occurs. In this research, the F-16 fighter scale-down model was made to 5:1, and five antennas were placed on the bottom of the model, then the radio waves of emitters were received by the antennas in the 0-360° azimuth angles. The accuracy test was performed by numerically analyzing the phases of the radio waves received by the five antennas. The azimuth error of the phase comparison direction finding with scale-down model was measured to be less than 0.5° when the signal noise ratio was larger than 0dB, and it could be very useful for the design of the phase comparison direction finding method of the fighter.

**Key Words** : Interferometer, Direction finding, Circular array, Convergence, Scale-down model

### 1. 서론

전자정보(ELINT: electronic intelligent) 시스템이나 전자전(EW: electronic warfare) 시스템, 조난 경보 시스템

에 많이 사용되는 전파 방향 탐지(이하 방탐) 장비는 넓은 지역에서 송신되는 전파신호를 신속하게 감지하여 전파송신기(Emitter)의 방향과 위치를 찾아야 한다. 특히 조난사고나 불법 전파발견 등은 빠른 시간 안에 상대방

송신기에서 방사되는 전파를 수신하여 전파가 송신되는 방향과 위치를 정확하게 찾아야 한다. 이처럼 전파 방탐 장치에서 자체적으로 송신신호를 방사하지 않고 상대방 송신기에서 방사하는 신호를 수신만 해서 전파의 방향을 찾는 방법을 수동형(Passive) 방탐이라 부른다[1].

수동형 방탐 방법에는 진폭비교 방탐, 위상비교 방탐, 시간비교 방탐, 주파수비교 방탐 등이 있다. 특히 여러 개의 전파원에서 신호가 동시에 송신되는 경우 전파신호들을 효과적으로 분리하기 위해서 MUSIC (Multiple Signal Classification) 방탐, averaged-MUSIC 방탐 기술 등이 사용되고 있다[2-5].

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 방위각 360°를 동시에 탐지할 수 있고 방탐 정확도가 높아서 최근에 많이 사용되고 있는 위상비교 방탐 장치의 위상비교 방위각 방탐 알고리즘을 개발하고, 개발 알고리즘을 F-16 전투기 5:1 축소모델에 안테나를 장착해서 수치해석한 결과를 이용해서 방탐 정확도를 시험하였다.

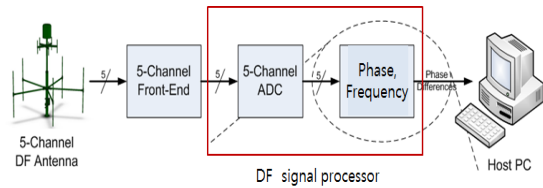


Fig. 1. Interferometer direction finder with array antennas

## 2. 위상비교 방탐 탐지 기법

### 2.1 2차원 위상비교 방탐 원리

방위각을 측정하는 2차원 위상비교 방탐 기술은 Fig. 2와 같이 잘 정합된 두 개의 안테나와 위상비교기(Phase comparator)를 사용한다. 두 채널의 안테나로 수신된 전파는 위상 비교기로 전달되고, 여기서 전파의 입사 방향에 따른 상대적인 위상차를 측정한다.

두 안테나의 전기적 중심을 연결하는 선을 기준선(Baseline)이라 부르며, 기준선의 길이가  $L$ 이고, 전파의 입사방위각이  $\psi$ , 입사신호의 파장이  $\lambda$ 일 때 두 안테나에서 측정되는 위상차  $\phi$ 는 식 (1)과 같이 구할 수 있다 [6].

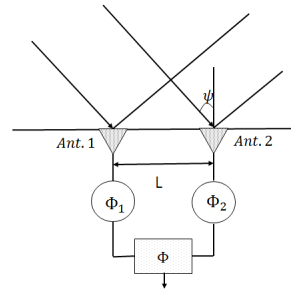


Fig. 2. Phase comparison direction finder

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L \cdot \sin\psi \quad (1)$$

식 (1)에서 전파의 입사방위  $\psi$ 는 식 (2)와 같이 유도할 수 있다. 또한 입사방위 오차(또는 방탐 정확도)  $\psi_e$ 는 식 (1)을 방위각  $\psi$ 에 대해 편미분하면 식 (3)과 같이 된다. 여기에서  $\phi_e$ 는 위상오차이다[7].

$$\psi = \sin^{-1}\left(\frac{\phi\lambda}{2\pi L}\right) \quad (2)$$

$$\psi_e = \phi_e \left(\frac{\lambda}{2\pi L \cos\psi}\right) \quad (3)$$

일반적으로 잡음신호에 의해서 발생하는 위상오차  $\phi_e$ 는 신호잡음비(SNR)를 사용하여 표시하고 있으며 위상비교 방탐에서는 보통 식 (4)와 같이 주어진다. 따라서 식 (4)를 식 (3)에 대입하여 위상오차에 대한 방위각 오차를 구하면 식 (5)와 같다[8,9].

$$\phi_e = \frac{1}{\sqrt{2SNR}} \quad (4)$$

$$\psi_e = \frac{\lambda}{2\pi L \cos\psi \sqrt{2SNR}} \quad (5)$$

### 2.2 3차원 위상비교 방탐 원리

방위각과 양각(또는 고각)의 영향을 동시에 고려하는 3차원 위상비교 방탐 기술은 Fig. 3과 같이 방위각  $\psi$ 와 고각  $\Theta$ 에 의해서 위상차가 발생하게 된다. 방위각과 고각을 별도로 정확하게 측정해야 하는 경우에는 방위각 측정 안테나와 고각측정 안테나 세트를 별도로 구성하여 각각의 방위를 측정하지만 육상이나 해상에서는 대부분의 경우 고각차가 작고 방위각 측정이 중요하므로 방위각 측정 중심으로 안테나 세트를 배치한다.

Fig. 3은 균일원형배열(UCA: uniform circular array) 구조를 이용한 방위각 탐지 개념도로 방위각이  $\psi$ , 고각이  $\theta$ 이고 인접한 안테나 사이의 거리는  $L$  이다. Fig. 3에서 전파의 입사방위가  $\psi$ 이고 입사신호의 파장  $\lambda$ 일 때, 인접한 두 안테나에서 측정되는 위상차  $\phi$ 는 식 (6)과 같이 구할 수 있다[10].

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L \cdot \sin\psi \cos\theta \quad (6)$$

식 (6)에서 전파의 입사 방위  $\psi$ 는 식 (7)과 같이 유도할 수 있으며, 방위각 방탐 정확도  $\psi_e$ 는 식 (6)을 방위각  $\psi$ 에 대해 편미분하여 식 (8)과 같이 되며, 여기에서  $\phi_e$ 는 위상오차이다.

$$\psi = \sin^{-1}\left(\frac{\phi\lambda}{2\pi L \cos\theta}\right) \quad (7)$$

$$\psi_e = \phi_e \left(\frac{\lambda}{2\pi L \cos\psi \cos\theta}\right) \quad (8)$$

잡음신호에 따른 위상오차는 식 (4)와 같으므로 식 (4)를 식 (8)에 대입하여 위상오차에 대한 방위각 오차를 구하면 식 (9)와 같다[11,12].

$$\psi_e = \frac{\lambda}{2\pi L \cos\psi \cos\theta \sqrt{2SNR}} \quad (9)$$

UCA 구조에 사용되는 안테나는 지향성 빔 특성을 갖는 스파이럴 안테나, 혼(Horn) 안테나와 비지향성 빔 특성을 갖는 모노폴 안테나, 블레이드(Blade) 등이 많이 사용된다. Fig. 4는 광대역 주파수에서 운용하는 90° 이상의 3dB 빔폭을 갖는 스파이럴 안테나모양과 방사패턴이다 [13,14].

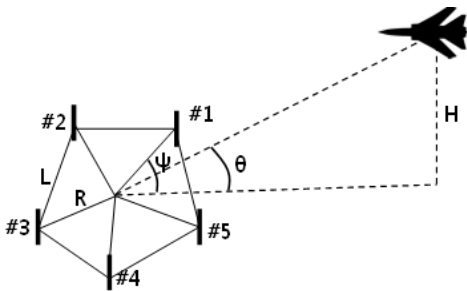


Fig. 3. 3-dimension Interferometer direction finder with UCA antennas

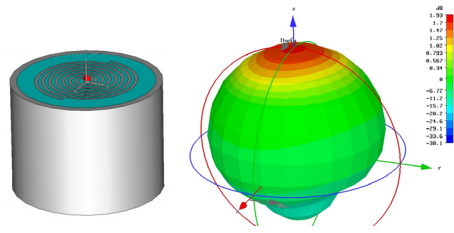


Fig. 4. The radiation pattern of a cavity backed spiral antenna

### 3. 위상 비교 방향 탐지 알고리즘

#### 3.1 알고리즘 구현

위상비교 방탐 정확도 알고리즘은 식 (9)로 유도된 방위각 오차를 안테나가 설치되는 플랫폼을 고려하여 계산하는 것으로 다음과 같이 크게 5개 모듈로 나누어서 구현된다.

- 1) 항공기 구조물 영향을 고려한 전파 수신신호 수치 해석 결과 입력
- 2) 안테나 위치좌표 설정
- 3) 안테나별 위상 도출
- 4) 방탐 오차 계산
- 5) GUI에 결과표시 .

Fig. 5는 방탐 정확도 계산 알고리즘의 플로우차트이며, F-16 축소모델에서 수치해석한 안테나별 신호세기과 위상을 입력받아서 안테나 상호간 위상차를 도출하고, 도출된 위상차에서 방위각 방향과 방탐오차를 계산하여 SNR별 그 결과를 표시한다.

#### 3.2 GUI 설계

그래픽 사용자 인터페이스(GUI)는 Fig. 5의 내용을 운용자가 쉽게 인지하여 자료를 입력하고 결과를 그래프 형태로 쉽게 볼 수 있도록 설계하였다. 입력 자료는 Fig. 6과 같이 입력요소별 팝업 창을 두었으며 수치해석 자료와 같이 용량이 큰 입력데이터는 파일 단위로 입력할 수 있게 구성하여 데이터 입력시간 단축과 정확도를 높일 수 있도록 작성하였다.

데이터 출력부분은 Fig. 6에서 보는 것과 같이 수평축에는 플랫폼의 방위각을 수직축에는 평균 방탐 오차를 표시해서 안테나 설치 위치에 따른 방위각별 방탐 정확도를 정확하게 볼 수 있도록 구현하였다[15].

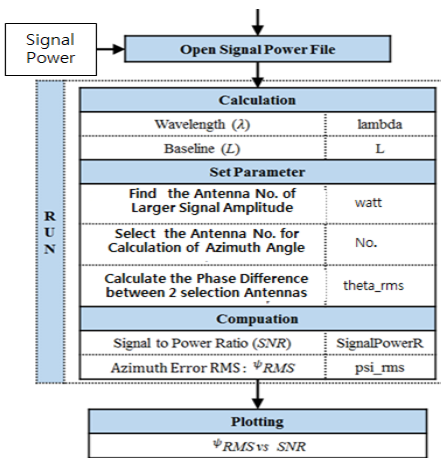


Fig. 5. Flowchart of the Direction finding Algorithm for Phase-comparison Method with Numerical Analysis

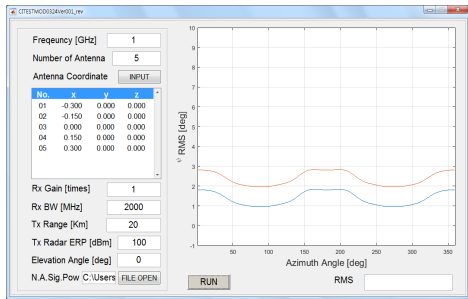


Fig. 6. GUI of the Simulator for Phase-comparison Method

#### 4. F-16 축소 모델을 사용한 시험

위상비교 방식의 방탐 정확도 시험은 안테나 설치구조물에 의한 전파간섭 영향을 수치해석 방법으로 구하는 전산 시뮬레이션에 의한 방법과 시험장에서 전파를 직접 방사하여 시험하는 시험장 시험방법이 있다. 최근에는 수치해석에 의한 구조물 해석이 정확해지고 속도도 빨라져서 수치해석을 사용하는 전산 시뮬레이션 방법이 많이 사용된다.

본 연구에서는 F-16 전투기를 Table 1과 같이 5:1 크기로 축소 모델링하여 수치해석을 이용하여 전파 수신시험을 실시하였다. Fig. 7과 같이 F-16 전투기 하부면 (Bottom of fighter)에 안테나를 배치하고 0-360° 방위에서 전파를 수신하여 수신되는 전파의 크기와 위상을 측정하여 위상비교 방탐 알고리즘을 이용하여 입사신호의 방위각을 측정하고, 측정된 방위각을 전파가 발사된 실제 방위각과 비교하여 측정오차를 구하였다.

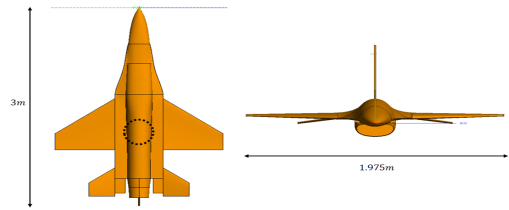


Fig. 7. F-16 Fighter 5:1 Scale-down Model

Table 1. 5:1 Scale-down Model of F-16 Fighter

Width	Length	Height	Speed
1.975 m	3.0 m	1.0 m	-

Fig. 8은 식 (9)를 사용하여 전파의 파장이 0.20m이고 기준선의 길이가 0.5λ, 1λ, 3λ 그리고 각각 θ가 0°인 경우, SNR에 대한 이론적인 방위각 오차를 표시하였다.

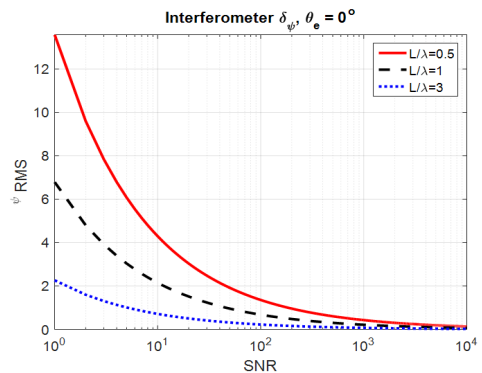


Fig. 8. Theoretical maximum range of Interferometer DF error( $\theta = 0^\circ$ )

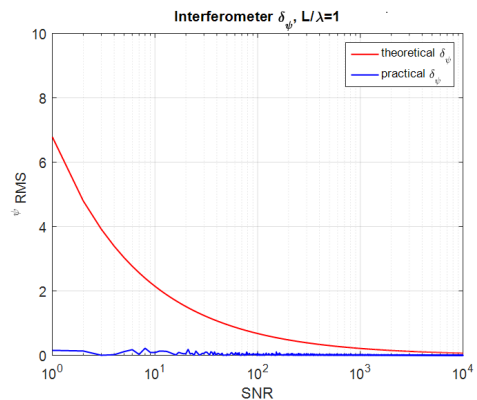


Fig. 9. Theoretical maximum range and practical error of Interferometer DF. ( $L/\lambda = 1$ )

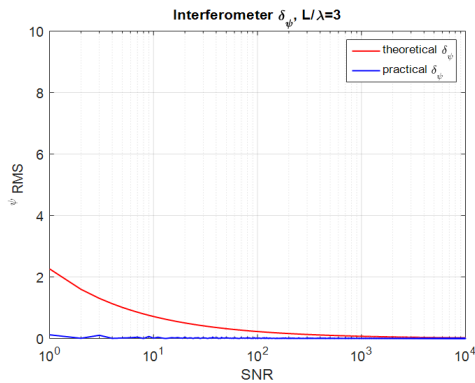


Fig. 10. Theoretical maximum range and practical error of Interferometer DF. ( $L/\lambda = 3$ )

Fig. 9와 Fig. 10은 Fig. 7의 전투기 모델에 평면파 신호를 입사하는 경우 5개 안테나에 수신되는 신호의 위상을 수치해석으로 계산한 후, 위상비교 방탐 알고리즘을 적용하여 실제 방탐 오차를 구하고, 식 (9)로 계산한 이론 오차를 함께 표시하였다. Fig. 9와 Fig. 10에서 측정오차는 SNR이 0dB 이상인 경우  $0.5^\circ$  이하로 이론오차보다 매우 작음을 알 수 있으며 이것은 UCA 안테나 구조에서는 안테나 기준선이 5개 이상의 복잡기준선이 되므로 각 기준선에서 처리하는 전파입사각  $\psi$ 의 범위가 좁아져서 방탐 오차가 작아지는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 F-16 전투기 축소모델을 사용한 위상비교 방향 탐지 장치의 방위각 정확도 시험에 대해서 연구하였으며, F-16 전투기를 5:1 모델로 축소 제작하고 전투기 하부면에 5개 안테나를 UCA 로 배열하여 방향 탐지 정확도 시험을 실시하였다. 축소모델을 사용한 방향 탐지는 실제 환경에서 발생할 수 있는 요소를 대부분 반영하였으며 SNR이 0dB 이상인 경우 측정오차가  $0.5^\circ$  이하로 정확하여 전투기의 방향 탐지 장치 설계에 잘 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- [1] Y. H. Kim, J. S. Lim, G. S. Chae & K. C. Kim. (2015). An investigation of the Azimuth Error for Correlative Interferometer Direction Finding. *Journal of the Korea Convergence Society*, 6(5), 249-255. DOI : 10.15207/jkcs.2015.6.5.249
- [2] F. Neri. (2001). *Introduction to electronic Defense Systems, 2nd ed*. Boston : Artech House.
- [3] G. D. Curtis Schleher. (1999). *A Electronic Warfare in the Information Age*. Boston : Artech House.
- [4] A. De Martino. (2012). *Introduction to modern EW systems*. Boston : Artech House.
- [5] J. S. Lim & G. S. Chae. (2016). Analysis of Direction Finding Accuracy for Amplitude-Phase Comparison and Correlative Interferometer Method. *Journal of the Society of Digital Policy & Management*, 14(1), 195-201. DOI : 10.14400/jdc.2016.14.1.195
- [6] Y. T. Kim & Y. S. Jeong. (2015). Optimization Routing Protocol based on the Location, and Distance Information of Sensor Nodes. *Journal of Digital Convergence*, 13(2), 127-133. DOI : 10.14400/jdc.2015.13.2.127
- [7] J. H. Lee & J. M. Woo. (2014). The Direction Finding Ambiguity Analysis for 3 Element and 4 Element Phase Interferometer DF System. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 17(4), 544-550. DOI : 10.9766/kimst.2014.17.4.544
- [8] E. L. Stephen. (1987). *Microwave Passive Direction Finding*. New York : A Wiley-Interscience Publication.
- [9] Y. Xun & Z. Z. Cui. (2009, October). Two-dimensional circular array real-time phase interferometer algorithm and its correction. In *Image and Signal Processing, 2009. CISP'09. 2nd International Congress on* (pp. 1-5). USA : IEEE.
- [10] G. S. Chae, J. S. Lim & Y. H. Kim. (2017). A RCS Investigation of Multiple Chaff clouds using Probability Distribution Characteristics. *Journal of the SMB Convergence Society*, 7(2), 37-42. DOI : 10.22156/cs4smb.2017.7.2.037
- [11] L. Dinoi, A. Di Vito & G. Lubello. (2008, May). Direction finding of ground based emitters from airborne platforms. In *Radar Conference, 2008. RADAR'08. IEEE* (pp. 1-6). USA : IEEE.
- [12] J. S. Lim. (2017). Data Convergence of Circular Array Correlative Interferometer Direction finding with

7-Antenna. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(11), 1-6.  
 DOI : 10.15207/jkcs.2017.8.1.001

[13] E. G. Lim, Z. Wang & S. Lee. (2013). Wearable antenna for Body area Network. *Journal of the SMB Convergence Society*, 3(2), 27-32.

[14] I. K. Lee et al. (2006). *Radar Engineering and Applications in Electronic Warfare*. Seoul : Dae-young Sa.

[15] J. S. Lim, Y. H. Kim & K. C. Kim. (2017). A Simulator for Analyzing of Correlative Interferometer Direction Finder. *Journal of the SMB Convergence Society*, 7(2), 53-58.  
 DOI : 10.22156/cs4smb.2017.7.2.053

### 저 자 소 개

임 중 수(Joong-Soo Lim) [정회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1994년 3월 : Auburn University 전자공학과(공학박사)
- 1980년 8월 ~ 2003년 12월 : 국방과학연구소

▪ 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수  
 <관심분야> : 전자파 이론, 방향탐지장치 설계, 전자전 장비 및 레이더설계/분석

채 규 수(Gyoo-Soo Chae) [증신회원]



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학석사)
- 2000년 12월 : Virginia Tech. 전기공학과(공학박사)

▪ 2001년 1월 ~ 2003년 2월 : Amphenol Mobile, RF manager  
 ▪ 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수  
 <관심분야> : 안테나 설계, 초고주파 이론

김 영 호(Young-Ho Kim) [정회원]



- 1995년 8월 : 홍익대학교 일반대학원 전자공학과 (전자공학석사)
- 2002년 8월 : 홍익대학교 일반대학원 전자공학과 박사수료(전자공학 전공)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 백석대학교

정보통신학부 강사

<관심분야> : 방향탐지기법, 네트워크, 자바, 안드로이드

김 기 출(Kichul Kim) [정회원]



- 1999년 8월 : 영남대학교 전자공학과(공학사)
- 2009년 8월 : University of Colorado at Boulder 전기전산/에너지공학과(공학석사)
- 2011년 5월 : University of Colorado at Boulder 전기전산/에너지공학과 (공학박사)

▪ 2011년 11월 ~ 현재 : 국방과학연구소

<관심분야> : 안테나, 응용전자기학, 나노물질 모델링 및 측정