

항공기 축소모델의 상관형 위상비교 방향탐지장치의 방위각 정확도

임중수

백석대학교 정보통신학부 교수

Azimuth Accuracy of Correlative Interferometer Direction Finder on Airborne Scale-down Model

Joong-Soo Lim

Professor, Division of Information Communication, Baekseok University

요 약 본 논문은 항공기 축소모델에 장착된 상관형 위상비교 방향 탐지장치의 방위각 측정 정확도에 대해서 기술하였다. 항공기 하부면에 안테나를 설치하면 날개 등에 의한 전파 반사가 일어나서 방위각 측정오차가 발생한다. 본 연구에서는 F-16 전투기 5:1 축소 모델의 하부면에 5개 안테나를 원형으로 배치한 다음에 0-360° 방위각에서 1° 간격으로 전파를 송신할 때 5개 안테나에 수신되는 전파의 위상을 수치해석으로 구한 다음 상관형 위상비교방식으로 데이터를 융합하여 방위각 측정 정확도를 계산하였다. F-16 전투기 축소 모델의 상관형 위상비교방식의 방위각 측정오차는 신호잡음세기가 3dB 이상인 경우 평균 1.0° 이하로 양호하게 나타나서 항공기용 상관형 위상비교 방향 탐지장치 설계에 매우 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 융합, 상관형, 위상비교, 방향탐지, 축소모델

Abstract This paper describes the azimuth accuracy of correlative interferometer direction finder on a scaled down airplane model. When the antennas are placed on the bottom of an airplane, reflection signals caused by an aircraft structure are arise and caused an azimuth error. In this paper, the F-16 fighter scale-down model was made to 5:1, and five antennas were placed on the bottom of the model. The accuracy was made by numerically analyzing the phases of the radio waves received by the five antennas when the signal of emitter was transmitted on 0-360° azimuth angles. The azimuth error of the correlative interferometer direction finder on the model was measured to be less than 1.0° when SNR was larger then 3dB, and it could be very useful for the design of the direction finder on airplane.

Key Words : Convergence, Correlative, Interferometer, Direction finding, Scale-down model

1. 서론

전파의 방향 탐지(이하 방탐) 장치는 3차원 공간에서 발생하는 전파신호원(이하 전파원)의 방향과 위치를 측정하는 장치로 조난구조, 환경감시, 전파감시, 정보수집

등에 많이 활용된다. 특히 조난구조나 불법 전파감시 등은 빠른 시간에 전파원의 위치를 정확하게 찾아야하기 때문에 전파의 감청기술과 함께 오래전부터 연구되어 왔다[1,2].

전파원의 위치와 방향을 찾는 방법은 레이더나 레이

*This work was supported by 2018 Baekseok University research fund.

*Corresponding Author : Joong-Soo Lim(jslim@bu.ac.kr)

Received July 18, 2018

Accepted October 20, 2018

Revised August 16, 2018

Published October 28, 2018

저처럼 전파를 송신하고 수신하는 능동적(active) 탐지 방식과 전파원에서 송신되는 신호를 수신만해서전파원의 방향을 찾는 수동형(passive) 탐지 방식이 있다[3,4].

수동형 방탐 방법에는 방탐장치의 배열안테나에 수신되는 전파의 진폭을 비교하는 진폭비교 방식, 위상을 비교하는 위상비교 방식, 전파 도착 시간을 비교하는 시간 비교 방식, 주파수를 비교하는 주파수비교 방식과 초분해능 방탐 방식인 MUSIC(multiple signal classification) 과 같은 방식이 있다[5,6].

위상비교 방탐장치는 선박이나 지상 장비, 항공기 등에 설치하여 3차원 공간의 전파를 탐지할 수 있으며 Fig. 1은 5-채널 안테나를 사용하여 방위각 360°를 동시에 탐지할 수 있는 상관형 위상비교(correlative interferometer) 방탐장치 구성도이다. 방탐장치는 전파를 수신하는 5개로 구성된 배열안테나와 수신신호를 중간주파수로 변환하는 front-end, 위상과 주파수를 추출하는 방탐 신호처리기와 전파원의 방위각을 표시하는 방탐 표시기로 구성 되어 있다.

본 논문은 2장에서 상관형 위상비교 방탐 정확도 분석, 3장에서 F-16 전투기 축소모델, 4장에서 상관형 위상비교 방탐 알고리즘 개발 및 방탐 정확도 시험에 대하여 기술한다.

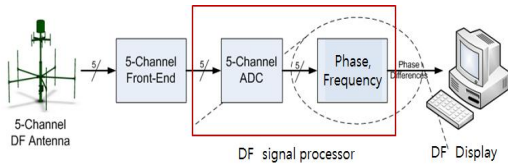


Fig. 1. Correlative interferometer direction finder with 5 antennas

2. 상관형 위상비교 방탐 정확도 분석

2.1 계산형 위상비교 방탐 정확도 분석

위상비교 방탐은 계산형 위상비교 방탐과 상관형 위상비교 방탐으로 나눌 수 있다. 계산형 위상비교 방법은 인접한 두 안테나 사이의 위상차를 사용하여 전파원의 방위각을 수식으로 계산하여 구하는 방법으로 우리가 일반적으로 말하는 위상비교 방탐을 말한다.

Fig. 2는 5개의 균일원형배열(uniform circular array : UCA) 방탐장치의 안테나 구성으로 항공기의 방위를 측

정하는 경우이다. 항공기가 1번 안테나와 5번 안테나 사이에 있는 경우 방탐장치를 기준으로 항공기의 양각(또는 고각)이 θ , 방위각이 ψ 이고, UCA 반경이 R, 인접한 안테나사이의 거리 L, 전파의 파장이 λ 이면 인접한 두 안테나에서 측정되는 수신전파의 위상차 ϕ 는 식 (1)과 같이 구할 수 있다[6-8].

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

식 (1)에서 전파의 입사 방위각 ψ 를 구하면 식 (2)과 같고, 방위각 최대오차(또는 방탐 정확도) ψ_e 는 식 (2)을 방위각 ψ 에 대해 편미분하여 구할 수 있으며 식 (3)과 같다. 식 (3)에서 ϕ_e 는 잡음이나 안테나 채널 불균형 등으로 발생되는 방탐 채널의 위상오차를 말한다[6].

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

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

2.2 상관형 위상비교 방탐 정확도 분석

상관형 위상비교 방탐은 잡음이 없는 경우 양각 0-90°, 방위각 0-360° 범위에서 N 개 안테나에 들어오는 신호의 기준 위상차(또는 계산 위상차) ϕ_k 을 기준메모리에 저장한 다음, 잡음이 있는 실제 환경에서 전파가 N 개 안테나에 들어올 때 측정된 위상차 $\hat{\phi}_k$ 을 기준메모리에 저장된 위상차와 비교하여 오차가 가장 작은 방위각을 전파가 입사하는 방위로 추정하는 방식이며 이 때 사용되는 안테나는 다이폴안테나 또는 블레이드 안테나와 같이 수평방향으로 비지향성 특성을 갖는 안테나 들이다.

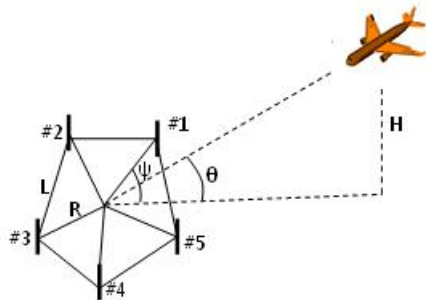


Fig. 2. Direction finding system of UCA structure with 5 antennas

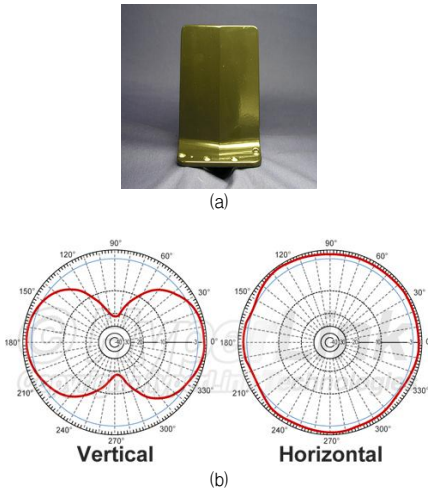


Fig. 3. Blade Antenna and beam patterns
(Cobham, model: 11D28500)[9]

Fig. 2와 같은 원형배열 방탐 안테나에서 반경이 R일 때 N 개의 안테나를 균일한 간격으로 배치하는 경우, 전파원의 위치가 양각 θ , 방위각 ψ 이면 k번째 안테나와 UCA 중심점에 도달하는 전파의 위상차 ϕ_k 는 다음과 같이 계산할 수 있다[10,11].

$$\phi_k = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\theta \cdot \cos\left(\frac{(k-1)2\pi}{N} - \psi\right) \quad (4)$$

여기서 k는 배열 안테나 번호이며 오각형인 경우 $k=1,2,3,4,5$ 이다.

Fig. 2에서 잡음이 있는 경우 잡음에 의해서 위상차가 달라지는데, 잡음 환경에서 k번째 안테나와 UCA 중심점에 도달하는 전파의 측정위상차를 $\hat{\phi}_k$, 잡음에 의한 측정 위상차 오차를 $\Delta\phi_k$ 라 하면 측정위상차 $\hat{\phi}_k$ 는 측정위상차 오차를 사용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_k &= \phi_k + \Delta\phi_k \\ &= \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\theta \cdot \cos\left(\frac{(k-1)2\pi}{N} - \psi\right) + \Delta\phi_k \end{aligned} \quad (4)$$

기준위상차와 측정위상차를 효과적으로 비교하기 위하여 상관함수 $J(\psi)$ 을 cosine 함수를 사용하여 구성하면 식 (6)과 같이 된다. cosine 함수를 상관함수로 사용하는 경우에는 $J(\psi)$ 가 최대가 되는 값이 위상차가 가장 작으므로 이 각도를 전파원의 방위각으로 추정할 수 있으며 식 (7)과 같이 유도된다.

$$J(\psi) = \sum_{k=1}^N \cos(\phi_k - \hat{\phi}_k) \quad (6)$$

$$\hat{\psi} = \arg \max J(\psi) \quad (7)$$

식(4)-(7)로부터 측정위상차 오차 $\Delta\phi_k$ 에 대한 방탐 오차 $\Delta\psi$ 의 분산(variation) σ_ψ^2 을 3차원 공간에서 구하면 식 (8)과 같이 유도된다[6].

$$\sigma_\psi^2 = \frac{\left(\frac{\hat{\sigma}_\phi}{\cos(\theta)}\right)^2}{\frac{N}{2} \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2} \quad (8)$$

여기에서 $\hat{\sigma}_\phi$ 은 측정위상차 오차 $\Delta\phi_k$ 의 표준편차이다. $\hat{\sigma}_\phi$ 은 잡음에 의한 영향이 가장 크므로 [12]에서 신호잡음비(SNR)를 이용한 위상 오차를 식 (9)과 같이 유도하였다. 따라서 식 (8)은 식 (10)과 같이 유도된다.

$$\hat{\sigma}_\phi = \frac{1}{SNR} \quad (9)$$

$$\sigma_\psi^2 = \frac{2}{N \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2 \cos^2(\theta)} \frac{1}{SNR} \quad (10)$$

또한 UCA의 반지름 R을 안테나 최소거리 L로 변환하면 $L = 2R \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)$ 이므로 식(10)은 식(11)과 같이 된다 [13,14].

$$\sigma_\psi^2 = \frac{2 \sin^2\left(\frac{\pi}{N}\right)}{N \left(\frac{\pi L}{\lambda}\right)^2 \cos^2(\theta)} \frac{1}{SNR} \quad (11)$$

]

3. F-16 전투기 축소 모델

본 연구에서 사용한 항공기는 F-16 전투기의 5:1 축소 모델로 길이 3.0m, 폭 1.975m, 높이 1.0m이며, Fig. 4와 같이 F-16 전투기 하부면(bottom of fighter)에 안테나를 배치하고 0-360° 방위에서 전파를 송신하여 안테나에 수신되는 전파의 위상을 측정하여 측정위상차 파일 signal power file을 만든다[15].

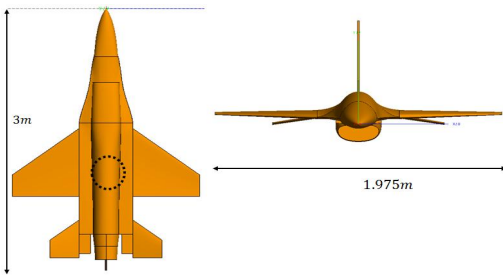


Fig. 4. F-16 Fighter 5:1 Scale-down Model

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

Width	Length	Hight	Speed
1.975 m	3.0 m	1.0 m	-

4. 상관형 위상비교 방탐 알고리즘과 방탐 정확도 시험

상관형 위상비교 방탐 알고리즘은 식 (4)로 계산되는 잡음이 없는 경우 각 안테나의 계산위상차(기준위상차)와 3장의 축소모델을 이용하여 잡음이 있는 경우의 측정 위상차를 구한 뒤 식 (7)과 같이 cosine 상관함수를 사용하여 최대값이 나오는 방위각을 전파원의 방위각으로 추정하는 내용으로 되어 있다.

본 연구에서 개발한 상관형 위상비교 알고리즘은 Fig. 5와 같이 4 개의 블록으로 구성할 수 있으며 4개의 블록은 1)initial input condition 2)open signal power file 3)azimuth error run 4)plotting 으로 구성되며 각 블록의 기능은 다음과 같다.

- 1) initial input condition: 사용주파수, 안테나 갯수와 안테나 위치좌표를 입력받아 0-360° 방위각에서 전파가 입사될 경우 각 안테나 사이의 기준(reference)위상차를 계산하여 저장.
- 2) open signal power file: 방탐 안테나가 항공기 등에 설치되면 주변 구조물의 영향을 받게 되어 전파 수신 신호에 오차가 생기게 된다. 이러한 오차 신호가 포함된 위상차를 각 안테나 별로 측정(또는 수치해석으로 계산)하여 저장한 측정위상차 파일을 호출.
- 3) azimuth error run: 기준위상차와 측정위상차를 방위각 1° 단위로 데이터를 융합하여 최대 상관함수를 도출하여 전파원의 방위각을 추정하고, 추정방위각과 참 방위각의 오차 계산.

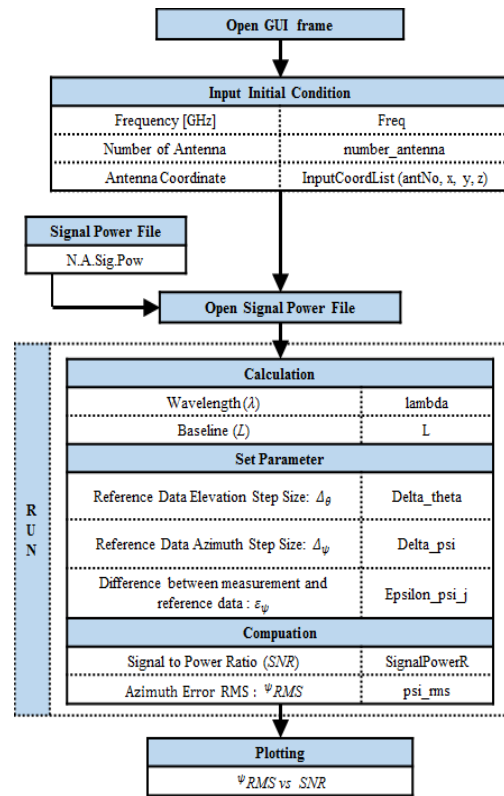


Fig. 5. Flowchart of correlative interferometer algorithm with numerical analysis

- 4) plotting: GUI에 전파원의 방위각 표시와 방탐 오차를 SNR 별로 표시하는 등 다양한 방탐결과를 표시.

5. 결 론

본 논문에서는 F-16 전투기를 5:1 모델로 축소 제작하고 전투기 하부면에 5개 안테나를 UCA 로 배열하여 방탐 정확도 시험을 실시하였다. 축소모델을 사용한 방향 탐지는 실제 환경에서 발생할 수 있는 요소를 대부분 반영하였으며 SNR이 3dB 이상인 경우 $L/\lambda = 0.125, 0.25, 0.4$ 이면 측정오차가 1.0° 이하, $L/\lambda = 0.5, 0.8, 1.0$ 인 경우는 0.8° 이하로 정확하여 전투기의 방탐 장치 등 각도 기반 탐지장비[16] 설계에 잘 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

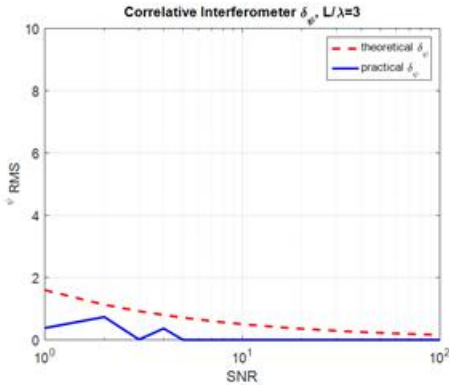


Fig. 6. Theoretical and practical error of correlative interferometer for F-16 scale-down model at $L/\lambda=3$

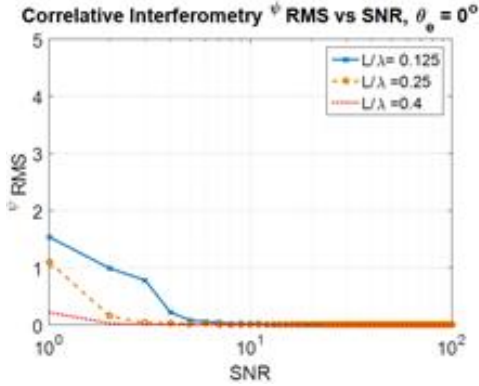


Fig. 7. practical error of correlative interferometer for F-16 scale-down model at $L/\lambda=0.125, 0.25, 0.4$

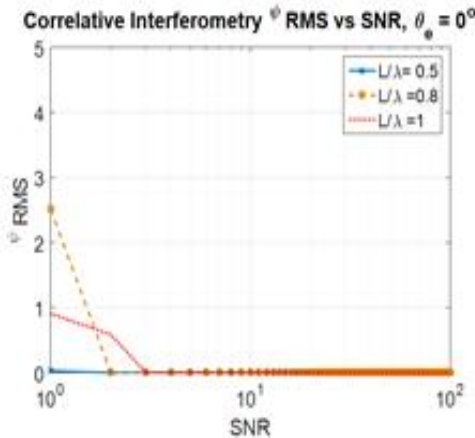


Fig. 8. practical error of correlative interferometer for F-16 scale-down model at $L/\lambda=0.5, 0.8, 1.0$

REFERENCES

- [1] Filippo Neri, (2001). *Introduction to electronic Defense Systems, 2nd ed*, Artech House, Boston, 324-34430.
- [2] G. D. Curtis Schleher. (1999). *A Electronic Warfare in the Information Age*, Artech House, Boston, 361-386.
- [3] J. S. Lim, (2017). Data Convergence of Circular Array Correlative Interferometer Direction finding with 7 Antennas. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(11), 1-6
- [4] J. S. Lim, (2017). Design of Wideband RF Frequency Measurement System with EP2AGX FPGA. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(7), 1-6
- [5] Sathish Chandran Editor. (2005). *Advanced in Direction-of-Arrival Estimation*, Artech House, Boston, 241-258.
- [6] Andrea De Martino. (2012). *Introduction to Modern EW Systems*, Artech House, Boston, 221-244.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] <http://www.cobham.com/advanced-electronic-solutions/integrated-electronic-solutions/electronic-warfare-systems/electronic-surveillance-es-subsystems/>
- [10] Libero Dinoi, Antonio Di Vito & Graziano Lubello. (2008). Direction Finding of ground based emitters from airborne platforms. *2008 IEEE Radar Conference*, 1-6.
- [11] Xun Yang & Cui Zhan-zhong. (2009). Two-Dimensional Circular Array Real-Time Phase Interferometer Algorithm and its Correction. *2nd International Congress on Image and Signal Processing*, 1-4.
- [12] Wiley R., (2006). *ELINT : The Interception and Analysis of Radar Signals*, Boston, Attech House, 131-135.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] J. S. Lim, G. S. Chae, Y. H. Kim & K. C. Kim. (2017). Azimuth Accuracy Test of Phase Comparison Direction Finding Method Using F-16 Fighter Scale-down Model. *Journal of the SMB Convergence Society*, 7(5), 83-88.
- [16] S. Y. Oh, K. C. Cho, J. H. Kim, J. B. Yun & K. J. Han (2013). A Self-Organizing Angle-based Routing Protocol for Urban Environments. *Journal of the Society of Digital Policy & Management*, 11(10), 379-385.

임 중 수 (Joong-Soo Lim)

[중신회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과
- 1994년 3월 : Auburn대학교 공과대학 전자공학과 (공학박사)
- 1980년 3월 ~ 2003년 2월 : 국방과학연구소 책임연구원, 전자전연구실장
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- 2003년 3월 ~ 2015년 2월 : 백석대학교 창업보육센터장
- 2016년 7월 ~ 현재 : 백석대학교 전산정보원장
- 관심분야 : ICT융합, 정보통신, 전자기기, 전자전, 레이더
- E-Mail : jslim@bu.ac.kr