

# 상관형 위상비교 방향 탐지의 고도차에 대한 방위각 오차분석

김영호<sup>1</sup>, 임중수<sup>2</sup>, 채규수<sup>2\*</sup>, 김기출<sup>3</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 전자공학과, <sup>2</sup>백석대학교 정보통신학부, <sup>3</sup>국방과학연구소

## An investigation of the Azimuth Error for Correlative Interferometer Direction Finding

Young-Ho Kim<sup>1</sup>, Joong-Soo Lim<sup>2</sup>, Gyoo-Soo Chae<sup>2\*</sup>, Kichul Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics, Hongik University

<sup>2</sup>Division of Information Communication Eng., Baekseok University

<sup>3</sup>Agency for Defense Development

**요약** 본 논문에서는 상관형 위상비교(correlative interferometer) 방향탐지의 방위각 오차에 대해서 기술하였다. 상관형 위상비교 방식은 잡음이 없는 이상적인 환경에서 계산한 위상과 잡음이 있는 실제 환경에서 측정된 위상을 상호 비교하여 상관계수가 가장 큰 방위각을 전파 발신기의 방향으로 추정하는 방식이다. 5개의 안테나를 원형으로 배치하는 원형 배열안테나(circular array antenna)를 이용하여 각 안테나 사이의 상관함수를 유도하여 잡음에 의한 방향탐지 오차를 유도하였다. 이 방법은 잡음에 대한 방탐오차가 매우 작고, 특히 전파 발사체와 방향탐지 장치의 고도 차이가 큰 경우에도 방향탐지 오차가 작은 것으로 나타났다.

• **Key Words** : 상관형 위상비교, 방향탐지, 배열안테나, 잡음, 방위각 오차

**Abstract** In this paper, we present an azimuth error analysis for the correlative interferometer direction finding. The correlative interferometer is a direction finding method that compares the theoretical and measured phase differences. The direction of the radio transmitter can be estimated by obtaining the maximum correlation between two data sets. We used a 5-element circular array antennas arranged in a circle. To derive the correlation function between antenna elements, we assume that the incident plane wave arrives from a certain angle and the phase difference of each antenna can be derived by comparing with the reference. The suggested direction finding gives a relatively accurate result even if the radio transmitter is located in the higher altitude.

• **Key Words** : Correlative interferometer, direction finding, array antenna, noise, azimuth error

### 1. 서론

전파감시장비나 재난구조, 군사용 전자전에 사용되는 수동형 전파 방향탐지 장치는 신호세기 비교방식, 신호

위상 비교방식과 복합비교방식이 있다[1,2,3,4,5]. 신호세기 비교방식은 안테나가 360°를 회전하면서 안테나 주위에 신호가 수신될 때 전파의 도래방향을 추정하는 회전

본 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

\*교신저자 : 채규수(gschaeb@bu.ac.kr)

접수일 2015년 7월 29일 수정일 2015년 8월 21일 게재확정일 2015년 10월 20일

방향탐지 방식과 여러 개의 안테나를 360°방향으로 배열해서 각 안테나에 수신되는 신호의 세기를 비교하여 도래방향을 추정하는 배열진폭비교 방향탐지 방식이다[2].

신호위상 비교방식은 직접위상 비교방식과 상관형 위상비교 방식으로 나눌 수 있다. 직접위상비교방식은 선형 인터페로미터 방탐으로 많이 불리고 있다. 이 방법은 전파 발신기(emitter)에서 송신된 신호가 두 개의 배열 안테나에 도달할 때, 두 안테나에 도달하는 거리의 차이를 위상차로 변화하여 신호 도래방향을 계산한다. 이 방식에서는 두 안테나 사이거리(baseline)가 길고, 주파수가 높을수록 방탐오차가 작아진다[5,6,7,8].

상관형 위상비교(correlative interferometer) 방탐은 원형(또는 정다각형) 배열 안테나를 이용하여 잡음이 없는 이상적인 환경에서 측정된 위상(또는 계산한 위상)과 잡음이 있는 실제 환경에서 측정된 위상을 상호 비교하여 상관값이 가장 큰 방위각을 전파의 도래방향으로 추정하는 방식이다.

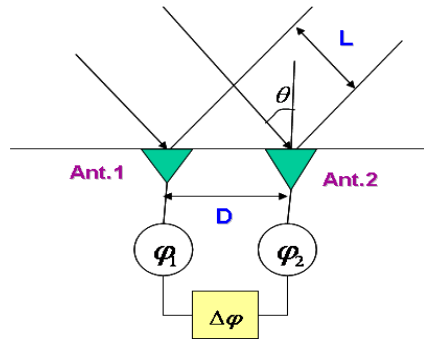
이 방법은 각 안테나로부터 이웃 안테나와 위상차를 초기에 측정하여 보상메모리(또는 위상차저장메모리)에 보관하고 실제 운용환경에서 입사된 전파의 위상차를 비교하여 상관관계가 가장 큰 방향을 추정하는 방식으로 360° 전 방위에 대해서 위상을 저장하고 비교하는 번거로움은 있지만 설치환경에서 발생하는 방탐오차를 작게 할 수 있어서 매우 중요하다. 상관형 위상비교 방식의 방탐 오차 원인은 신호잡음과 전파의 난반사에 의한 위상왜곡, 보상메모리의 위상데이터 분해능과 저장간격 등이 있으며, 진폭 방탐이나 선형 위상비교 방탐에 비해 잡음오차의 영향이 작다. 위상차표시분해능 오차는 360° 위상을 몇 비트데이터로 저장하는지에 따른 위상차표시 정확도이고 1°이하이면 양호하다고 볼 수 있다. 또한 저장데이터의 방위각 및 고각 간격은 작을수록 오차는 줄어들지만 보상메모리 용량이 커지고 위상을 비교하는 시간이 길어지는 단점이 있다[8,9,10].

## 2. 선형 위상비교 방탐 장치

위상 비교 방식은 일명 인터페로미터(Interferometer) 방식이라고도 하며, 이 방식의 기본 구성은 그림 1과 같이 잘 정렬된 두 개의 안테나와 수신기이며, 두 채널의 안테나로 수신된 전파는 각 수신기에서 중간주파수(IF)로 변환되어 위상 비교기로 전달되고, 여기서 두 신호의 도래

방향에 따른 상대적인 위상 각도를 측정한다. Baseline은 두 안테나의 전기적 중심을 잇는 선이며, 두 안테나의 상대적 위치는 고정되어있다. Baseline의 길이는 D이고, 입사방위가  $\theta$ 일 때, D 간격의 두 안테나에서 측정되는 위상  $\phi_n$ 은 식 (1)과 같이 되어 위상차 측정으로부터 방위를 얻는다. 여기서  $\lambda$ 는 입사신호의 파장이다.

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



[Fig. 1] Interferometer principle

## 3. 상관형 위상비교 방향탐지

상관형 방탐기가 그림 2와 같이 반경이 R인 원형배열 (uniform circular array; UCA) 형태로 구성되어 있고, 전파가 그림 2와 같이 고각  $\theta$ , 방위각  $\psi$ 방향에서 입사한다고 하면 k번째 안테나와 UCA의 중심점에 도달하는 전파의 위상차  $\phi_k$ 는 다음과 같다 [11,12,13,14,15].

$$\phi_k = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos(\theta) \cos\left(\frac{(k-1)2\pi}{5} - \psi\right) \quad (2)$$

여기서 k는 배열 안테나 번호이며  $k = 1, 2, \dots, 5$  이다.

잡음이 있는 경우 잡음의 크기를  $n_k$ 라 하면 잡음에 의해서 측정위상차가 달라진다. 잡음 환경에서 측정된 위상차를  $\hat{\phi}_k$ , 잡음에 의한 위상차를  $\Delta\phi_k$ 이라 정의하면 계산 위상차  $\phi_k$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_k &= \phi_k + \Delta\phi_k \\ &= \frac{2\pi R}{\lambda} \cos(\theta) \cos\left(\frac{(k-1)2\pi}{5} - \psi\right) + \Delta\phi_k \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2), (3)을 이용하여 cosine 함수를 사용하는 상관함수  $J(\psi)$ 를 구하면 식 (4)와 같다.

$$J(\psi) = \sum_{k=1}^5 \cos(\phi_k - \hat{\phi}_k) \quad (4)$$

상관형 위상비교 방탐에서 추정방위각  $\hat{\psi}$  는 진 방위각  $\psi$  와 방탐오차  $\Delta\psi$  의 합으로 식 (5)와 같으며, 이 값은 식 (6)과 같이 상관함수  $J(\psi)$ 가 최대가 되는 방위각이 된다.

$$\hat{\psi} = \psi + \Delta\psi \quad (5)$$

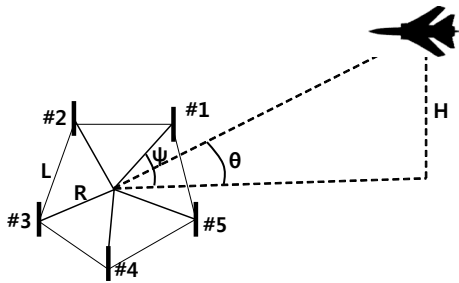
$$\hat{\psi} = \arg \max J(\psi) \quad (6)$$

식 (5)로부터  $\hat{\psi}$  와  $\psi$ 가 같은 경우

$$\left. \frac{\partial J(\hat{\psi})}{\partial \hat{\psi}} \right|_{\hat{\psi}=\psi} = 0 \quad (7)$$

가된다. 따라서 식 (2), (3), (4)를 이용하면 식(8)이 유도된다.

$$\sum_{k=1}^5 \sin \left[ \frac{2\pi R}{\lambda} \cos \left( \frac{2\pi}{5} (k-1) - \hat{\psi} \right) - \hat{\phi}_k \right] \times \frac{2\pi R}{\lambda} \cos(\theta) \sin \left( \frac{2\pi}{5} (k-1) - \hat{\psi} \right) \approx 0 \quad (8)$$



[Fig. 2] Direction finding system geometry

식 (2), (3)에서는 전파가 고각  $\theta$ 에서 입사할 때 3차원 환경에서 위상차를 계산하기 위해서  $\cos(\theta)$ 를 곱하였으나 전파가 고각  $0^\circ$ 에서 입사하는 2차원인 경우에는  $\cos(0) = 1$ 이므로 고각이 위상차에 영향이 없다. 따라

서 고각이 크지 않은 경우에는 식 (8)에서  $\cos(\theta)$ 는 약 1이 되므로 생략할 수 있다. 또한 고각이 큰 경우에는 위상차( $\phi$ )는 고각의 함수이므로 2차원에서 계산한 위상차( $\phi$ )에  $\cos(\theta)$ 를 곱해주면 된다. 따라서 고각이 작은 경우 식 (8)은 식 (9)와 같이 쓸 수 있다[7].

$$\sum_{k=1}^5 \sin \left[ \frac{2\pi R}{\lambda} \cos \left( \frac{2\pi}{5} (k-1) - \hat{\psi} \right) - \hat{\phi}_k \right] \times \sin \left( \frac{2\pi}{5} (k-1) - \hat{\psi} \right) \approx 0 \quad (9)$$

식 (9)에  $\hat{\psi} = \psi + \Delta\psi$ 를 대입하면

$$\sum_{k=1}^5 \left[ \frac{2\pi R}{\lambda} \cos(c_k) - \hat{\phi}_k + \frac{2\pi R}{\lambda} \Delta\psi \sin(c_k) \right] \times (\sin(c_k) - \Delta\psi \cos(c_k)) \approx 0 \quad (10)$$

여기서  $c_k = \frac{2\pi}{5}(k-1) - \psi$ 이고, 식 (10)을  $\Delta\psi$ 에 대해서 정리하면

$$\sum_{k=1}^5 \left[ \hat{\phi}_k \cos(c_k) + \frac{2\pi R}{\lambda} (\sin^2(c_k) - \cos^2(c_k)) \right] \Delta\psi = \sum_{k=1}^5 \left[ \hat{\phi}_k \sin(c_k) - \frac{2\pi R}{\lambda} (\cos(c_k) \sin(c_k)) \right] \quad (11)$$

$$\Delta\psi = \frac{\sum_{k=1}^5 \left[ \hat{\phi}_k \sin(c_k) - \frac{2\pi R}{\lambda} (\cos(c_k) \sin(c_k)) \right]}{\sum_{k=1}^5 \left[ \hat{\phi}_k \cos(c_k) + \frac{2\pi R}{\lambda} (\sin^2(c_k) - \cos^2(c_k)) \right]} \quad (12)$$

식 (3)을 식 (12)에 대입하면

$$\Delta\psi = \frac{\sum_{k=1}^5 \Delta\phi_k \sin(c_k)}{\sum_{k=1}^5 \left[ \Delta\phi_k \cos(c_k) + \frac{2\pi R}{\lambda} \sin^2(c_k) \right]} \approx \frac{\sum_{k=1}^5 \Delta\phi_k \sin(c_k)}{\frac{2\pi R}{\lambda} \sum_{k=1}^5 \sin^2(c_k)} \quad (13)$$

식 (13)의 양변에 기댓값을 취하고  $E\{\Delta\phi_k\} \approx 0$ 를 취하면

$$E\{\Delta\psi\} \approx 0 \quad (14)$$

저잡음 영역에서 방위각에 대한 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{var}\Delta\psi &= \frac{E\left\{\left(\sum_{k=1}^5 \Delta\phi_k \sin(c_k)\right)^2\right\}}{\left(\frac{2\pi R}{\lambda} \sum_{k=1}^5 \sin^2(c_k)\right)^2} \\ &= \frac{\sigma_\phi^2}{\left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2 \sum_{k=1}^5 \sin^2(c_k)} \end{aligned} \quad (15)$$

여기에서  $\sum_{k=1}^5 \cos 2c_k = 0$ 이므로, 분산  $\sigma_\psi^2$ 은 식 (16)과 같다.

$$\sigma_\psi^2 = \frac{\sigma_\phi^2}{\frac{M}{2} \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2} \quad (16)$$

식 (16)에서 고각이 큰 경우에는 고각의 영향에 따라

$\sigma_\phi = \frac{\hat{\sigma}_\phi}{\cos(\theta)}$ 를 대입하는 것이 좋다.

$$\sigma_\psi^2 = \frac{\left(\frac{\hat{\sigma}_\phi}{\cos(\theta)}\right)^2}{\frac{5}{2} \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2} \quad (17)$$

식 (17)에서  $\hat{\sigma}_\phi^2 = \frac{1}{2SNR}$ 이므로 식 (17)은 식 (18)과 같이 된다.

$$\sigma_\psi^2 = \frac{2}{5 \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2 \cos^2(\theta)} \frac{1}{2SNR} \quad (18)$$

식 (18)에서 UCA의 반지름 R을 배열안테나 거리 L로 변환하면  $L = 2R \sin\left(\frac{\pi}{5}\right)$ 이므로

$$\sigma_\psi^2 = \frac{2 \sin^2\left(\frac{\pi}{5}\right)}{5 \left(\frac{\pi L}{\lambda}\right)^2 \cos^2(\theta)} \frac{1}{2SNR} \quad (18)$$

표준편차를 구하면 식 (19)와 같다.

$$\sigma_\psi = \frac{\sqrt{10} \sin\left(\frac{\pi}{5}\right)}{\left(\frac{5\pi L}{\lambda}\right) \cos(\theta)} \sqrt{\frac{1}{2SNR}} \quad (19)$$

보상메모리에 의한 오차는 그림 3과 같이 방위각 간격, 고각 간격, 위상차표시분해능 등에 의한 요인이 있다. 위상차표시분해능 오차는  $360^\circ$  위상차를 몇 비트데이터로 저장하는지에 따라 변하는 일종의 샘플링 비이고,  $1^\circ$  이하이면 양호하다고 볼 수 있다. 보상메모리 구성을 그림 2와 같이 방위각 간격은  $\Delta\psi$ , 고각 간격은  $\Delta\theta$ , 방위각 저장순서를  $i$ , 고각 저장순서를  $j$ 로 정의하면 식 (2)를 사용하여 보상메모리에 저장되는 위상차는 다음과 같다.

$$\phi_{k,k+1}^{(i,j)} = \frac{2\pi L}{\lambda} \cos(i\Delta\theta) \sin\left(j\Delta\psi + \frac{(k-1)2\pi}{5}\right) \quad (20)$$

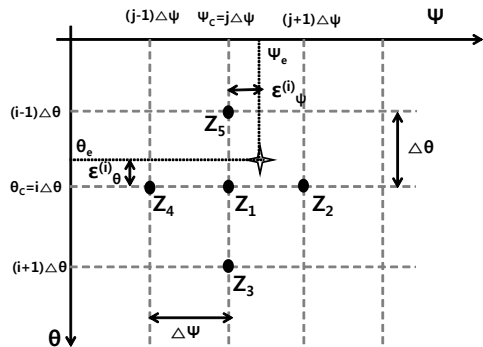
실제 고각이  $\theta_e$ , 방위각이  $\psi_e$ 이면 보상메모리에 의한 오차는 다음과 같다.

$$\varepsilon_\theta^{(i)} = \theta_e - i\Delta\theta \quad (21)$$

$$\varepsilon_\psi^{(j)} = \psi_e - j\Delta\psi \quad (22)$$

식 (19)에 위상차표시분해능 오차를 추가하면 식 (23)과 같다[7].

$$\sigma_\psi = \frac{\sqrt{10} \sin\left(\frac{\pi}{5}\right)}{\left(\frac{5\pi L}{\lambda}\right) \cos(\theta) \cos^2(\varepsilon_\psi^{(j)})} \sqrt{\frac{1}{2SNR} + \frac{\Delta_Q^2}{12}} \quad (23)$$



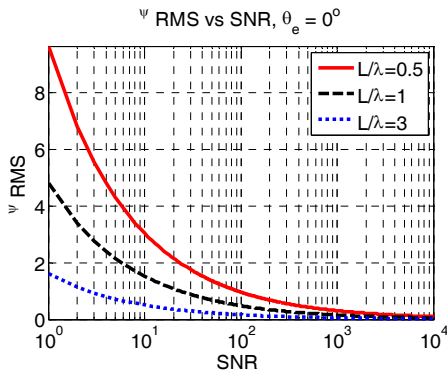
[Fig. 3] Direction finding system geometry

### 4. Simulation Results

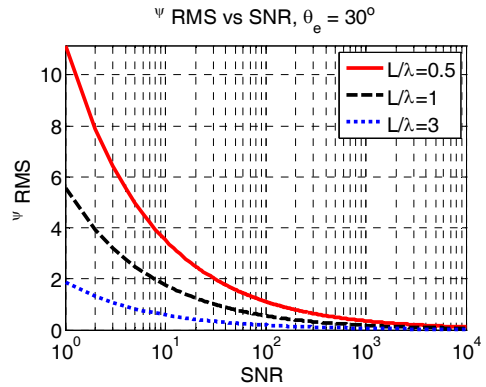
그림 4는 앞에서 설명한 오각형 구조의 방탐장치에서 탐지할 표적의 고도가 방향탐지 수신기 고도와 같은 경우, 즉 고각이 0°인 경우 SNR에 대한 방위각 탐지오차를 시뮬레이션 한 결과이다. SNR이 20dB이고 파장에 대한 이웃안테나 사이의 거리(L/λ)가 0.5, 1.0, 3.0인 경우 방위각 오차는 0.97°, 0.48° 및 0.16°이다. 그림 5는 탐지할 표적의 고각이 30°인 경우 SNR에 대한 방위각 탐지오차를 시뮬레이션 한 결과이다. SNR이 20dB이고 파장에 대한 이웃안테나 사이의 거리(L/λ)가 0.5, 1.0, 3.0인 경우 방위각 오차는 1.12°, 0.56° 및 0.19°이다. 그림 6은 탐지할 표적의 고각이 60°인 경우 SNR에 대한 방위각 탐지오차 시뮬레이션 결과이다. SNR이 20dB이고 파장에 대한 인접안테나 사이의 거리(L/λ)가 0.5, 1.0, 3.0인 경우 방위각 오차는 1.93°, 0.93° 및 0.32°이다.

### 5. 결론

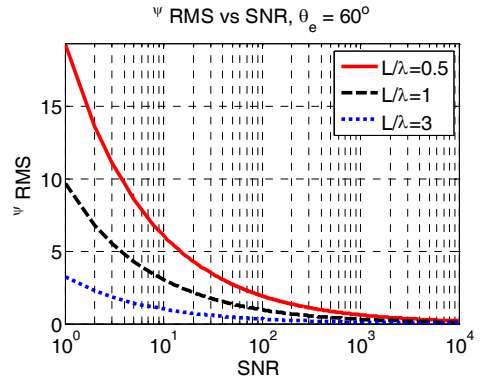
본 연구에서는 상관형위상비교 방향탐지의 방위각 오차에 대한 연구가 수행되었다. 이차원 평면에 5개의 안테나를 원형으로 배열하였고 안테나로 수신되는 전파의 위상차를 이용하여 상관함수를 유도하여 방향탐지 오차를 계산하였다. 고각이 0°, 30°, 60°인 경우 SNR에 따른 방위각 오차가 계산되었고, 안테나 이격거리(L)에 따른 오차가 제시 되었다. 이 방법은 다른 방향탐지 방법에 비해 잡음에 대한 영향이 매우 작고, 특히 전파 발사체와 방향탐지 장치의 고도 차이가 큰 경우에 적합한 것으로 나타났다.



[Fig. 4] Azimuth DF Accuracy vs SNR @ Elevation Angle=0°



[Fig. 5] Azimuth DF Accuracy vs SNR @ Elevation Angle=30°



[Fig. 6] Azimuth DF Accuracy vs SNR @ Elevation Angle=60°

### ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### REFERENCES

- [1] Filippo Neri, *Introduction to electronic Defense Systems (2nd Edition)*, Artech House, Boston, 2001.
- [2] G. D. Curtis Schleher, *A Electronic Warfare in the Information Age*, Artech House, Boston, 1999.
- [3] Stephen E. Lipsky, *Microwave Passive Direction Finding*, A Wiley-Interscience Publication, New York, 1987.

[4] David Adamy, *EW101 A first Course in Electronic Warfare*, Artech House, Boston, 2001.

[5] Richard G. Wiley, *ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals*, Artech House, Boston, 2006.

[6] David L. Adamy, *Electronic Warfare Modeling and Simulation*, Artech House, Boston, 2003.

[7] Andrea De Martino, *Introduction to Modern EW Systems*, Artech House, Boston, 2012.

[8] Kebeli, M., "Extended symmetrical aperture direction finding using correlative interferometer method," *7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. pp. II-209~II-213, 2011.

[9] S. M. Kamal, A. A. Adam, A. S. Ajagun, "Performance Evaluation of Correlative Interferometry for Angle of Arrival Estimation," *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, No. 1, pp. 43-48, 2015.

[10] Libero Dinoi, Antonio Di Vito, Graziano Lubello, "Direction Finding of ground based emitters from airborne platforms," 2008 IEEE Radar Conference, pp. 1-6, 2008.

[11] Ling Qin, Kexin Jia, Zishu He, "Performance analysis of correlative interferometer direction finder using cosine function," *Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, 2010, pp. 1-4, 2010.

[12] Ting Cheng, Xintao Gui and Xin Zhan, "A dimension separation-based two-dimensional correlation interferometer algorithm," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, December 2013, 2013:40

[13] H.-W. Wei and Y.-G. Shi, "Performance analysis and comparison of correlative interferometers for direction finding," in *Signal Processing (ICSP)*, 2010 IEEE 10th International Conference on, pp. 393 - 396, Oct. 2010.

[14] Xun Yang and Cui Zhan-zhong, "Two-Dimensional Circular Array Real-Time Phase Interferometer Algorithm and its Correction," 2nd

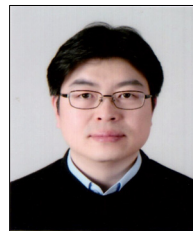
International Congress on Image and Signal Processing, pp. 1-4, 2009.

[15] J. H. Lee, J. M. Woo, "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*, Vol. 17, No. 4, pp. 544-550, 2014.

저자소개

김 영 호(Young-Ho Kim)

[정회원]



- 1995년 8월 : 홍익대학교 일반대학원 전자공학과(전자공학석사)
- 2002년 8월 : 홍익대학교 일반대학원 전자공학과 박사수료(전자공학전공)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 강사

<관심분야> : 방향탐지기법, 네트워크, 자바, 안드로이드

임 중 수(Joong-Soo Lim)

[종신회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1987년 7월 : 충남대학교 전자공학과(공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University 전기공학과(공학박사)

- 1980년 8월 ~ 2003년 12월 : 국방과학연구소
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야> : 전자과 이론, 방향탐지기장치 설계, 전자전 장비 및 레이더설계/분석

채 규 수(Gyoo-Soo Chae)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학석사)
- 2000년 12월 : Virginia Tech. 전기공학과(공학박사)
- 2001년 1월 ~ 200년 2월 : Amphenol Mobile, RF manager
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수  
<관심분야> : 안테나 설계, 초고주파 이론

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