

상관형 위상비교 방향탐지장치의 정확도 분석 시뮬레이터

임중수^{1*}, 김영호¹, 김기출²
¹백석대학교 정보통신학부, ²국방과학연구소

A Simulator for Analyzing the Accuracy of Correlative Interferometer Direction Finder

Joong-Soo Lim^{1*}, Young-Ho Kim¹, Kichul Kim²

¹Division of Information Communication Eng., Baekseok University

²Agency for Defense Development

요약 본 논문은 상관형 위상비교(correlative interferometer) 방향탐지 장치의 정확도 분석용 시뮬레이터 설계에 대하여 기술하였다. 상관형 위상비교 방향탐지는 잡음에 강인하므로 안테나 설치가 복잡한 항공기나 함정 등에서 많이 사용되며 방향탐지 정확도가 매우 높다. 또한 전파가 특정 방위각에서 입사될 때 잡음이 없는 환경에서 계산한 위상차와 잡음이 있는 실제 환경에서 측정된 위상차를 융합하여 상관계수가 가장 큰 값을 전파의 방위각으로 추정하는 방식이다. 시뮬레이터는 전파의 주파수, 방탐장치 안테나 수, 안테나 좌표, 전파의 송신신호 세기, 수신기의 대역폭, 이득, 플랫폼(platform)의 전파간섭 등을 입력으로 받아서 0-360도 방위각과 0-60도 고각에 대한 방향탐지 정확도를 계산한다. 시뮬레이터는 실제 환경에서 발생할 수 있는 요소를 대부분 반영하였으므로 방향탐지 오차 분석이 0.5도 이하로 정확하고 함정과 항공기의 방탐장치 설계에 잘 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 상관형 위상비교, 방향탐지, 배열 안테나, 융합, 시뮬레이터.

Abstract This paper describes the design of a simulator for analyzing the accuracy of a correlative interferometer(CI) direction finder. CI direction finder is robust to noise, so it is often used in aircraft or ships where complex antenna installation is required, and the direction finding accuracy is very high. When the radio wave is incident at a specific azimuth angle, the phase difference calculated in a noiseless environment and the phase difference measured in a real environment with noise are fused to estimate the largest correlation coefficient as the azimuth angle of the radio wave. The simulator receives RF frequency, the number of antennas, the antenna coordinates, the transmission signal intensity, the bandwidth of the receiver, the gain and the payload effect, and calculates the direction finding accuracy of 0-360 degrees azimuth and 0-60 degree elevation with 0.5 degree. accuracy.

Key Words : correlative interferometer, direction finding, array antenna, convergence, simulator

1. 서론

전파 신호원(emitter)의 방향을 탐지하는 방식에는 진폭비교 방향탐지, 위상비교 방향탐지, 주파수비교 방향탐

지, 시간비교 방향탐지 등이 주로 사용된다. 그 중에서도 항공기나 함정처럼 안테나 설치 위치가 곡면이거나 구조물이 복잡한 경우에는 안테나 상호간의 전파 간섭 현상이 커서 위상비교 방향탐지를 많이 사용한다[1-4].

위상비교방식은 직접 위상 비교방식과 상관형 위상비교 방식으로 나누며, 직접 위상비교방식은 전파 신호원에서 송신된 전파가 방향탐지 장치의 두 개의 배열 안테나에 도달할 때, 두 안테나에 도달하는 전파의 위상차를 이용하여 송신기의 위치와 방향을 계산하는 방식으로 두 안테나 사이거리(baseline)가 길고, 주파수가 높을수록 방향 정확도가 높아진다[5,6].

상관형 위상비교 방법은 배열 안테나를 다각형 모양으로 설치하고 0-359도 방위각 별로 전파가 입사될 때 이웃 안테나 사이의 계산 위상차와 잡음이 있는 실제 환경에서 측정 위상차를 수치적으로 융합하여 상관값이 가장 큰 방위각을 전파의 입사방향으로 추정하는 방식이다.

본 논문에서는 2장에서 상관형 위상비교 방향 탐지 오차 요인을 분석하고 3장에서 시뮬레이터 구성과 알고리즘에 대해서 기술하였다.

2. 상관형 위상비교 방향탐지 오차

상관형 방향탐지가 Fig. 1과 같이 반경이 R인 원형배열(uniform circular array; UCA) 형태로 N 개의 안테나로 구성되어 있고, 전파가 고각 θ , 방위각 ψ 방향에서 입사한다고 하면, k번째 안테나와 UCA 중심점에 도달하는 전파의 위상차 ϕ_k 는 다음과 같이 계산할 수 있다[7-9].

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

여기서 k는 배열 안테나 번호이며 오각형인 경우 $k=1,2,\dots,5$ 이다. 바다나 육상에서 전파가 송신되는 경우에는 고각의 영향이 매우 작으므로 식 (2)에서 고각에 의한 위상차를 나타내는 $\cos(\theta)$ 값을 1로 계산할 수 있어서 식 (3)과 같이 기술할 수 있다.

$$\phi_k = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\left(\frac{(k-1)2\pi}{N} - \psi\right) \quad (3)$$

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

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

식 (2), (4)를 이용하여 cosine 함수를 사용하는 계산위상차와 측정위상차의 상관함수 $J(\psi)$ 를 구하면 식 (5)와 같다.

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

상관형 위상비교 방법에서 추정방위각 $\hat{\psi}$ 는 진 방위각 ψ 와 방향오차 $\Delta\psi$ 의 합으로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 상관함수 $J(\psi)$ 가 최대가 되는 값이 추정방위각이 된다.

$$\hat{\psi} = \psi + \Delta\psi \quad (6)$$

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

식 (6)으로부터 $\hat{\psi}$ 와 ψ 가 같은 경우 $\hat{\psi}$ 에 대한 상관함수의 미분값은 0이 되므로 식(4)~(6)에서 식(8)을 유도할 수 있다.

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

식 (8)에 $\hat{\psi} = \psi + \Delta\psi$ 를 대입하면 식 (9)가 유도된다.

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

여기서 $c_k = \frac{2\pi}{N}(k-1) - \psi$ 이고, 식 (9)을 $\Delta\psi$ 에 대해서 정리하면 식 (10)과 같다.

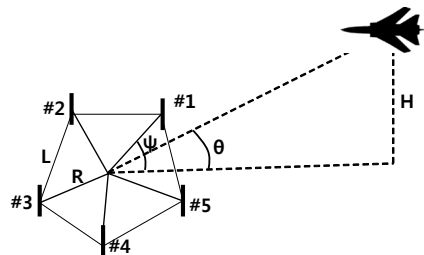


Fig. 1. Direction finding system of UCA structure with 5 antennas[9]

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

식 (4)의 측정위상차 $\hat{\phi}_{k^*}$ 를 식 (10)에 대입하면 식 (11)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= \frac{\sum_{k=1}^N \Delta\phi_k \sin(c_k)}{\sum_{k=1}^N \left[\Delta\phi_k \cos(c_k) + \frac{2\pi R}{\lambda} \sin^2(c_k) \right]} \quad (11) \\ &\approx \frac{\sum_{k=1}^N \Delta\phi_k \sin(c_k)}{\frac{2\pi R}{\lambda} \sum_{k=1}^N \sin^2(c_k)} \end{aligned}$$

식 (11) 양변에 기댓값을 취하고, $E\{\Delta\phi_k\}=0$ 를 대입하면 $E\{\Delta\psi\} \approx 0$ 가 되므로 방위각에 대한 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{var}\Delta\psi &= \frac{E\left\{\left(\sum_{k=1}^N \Delta\phi_k \sin(c_k)\right)^2\right\}}{\left(\frac{2\pi R}{\lambda} \sum_{k=1}^N \sin^2(c_k)\right)^2} \quad (12) \\ &= \frac{\sigma_\phi^2}{\left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2} \frac{1}{\sum_{k=1}^N \sin^2(c_k)} \end{aligned}$$

여기서 $\sin^2 c_k = \frac{1}{2}(\cos 2c_k - 1)$, $\sum_{k=1}^N \cos 2c_k = 0$ 이므로, 분산 σ_ψ^2 은 식(13)과 같다.

$$\sigma_\psi^2 = \frac{\sigma_\phi^2}{\frac{N}{2} \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2} \quad (13)$$

식 (13)에서 고각이 큰 경우에는 고각의 영향에 따라 $\sigma_\phi = \frac{\hat{\sigma}_\phi}{\cos(\theta)}$ 를 대입하는 것이 필요하다.

$$\sigma_\psi^2 = \frac{\left(\frac{\hat{\sigma}_\phi}{\cos(\theta)}\right)^2}{\frac{N}{2} \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2} \quad (14)$$

위상차 오차는 신호잡음비(SNR)에 크게 영향을 받으므로 $\hat{\sigma}_\phi^2 = \frac{1}{2SNR}$ 로 유도된다. 따라서 식 (14)는 식 (15)과 같이 유도된다[10].

$$\sigma_\psi^2 = \frac{2}{N \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2 \cos^2(\theta)} \frac{1}{2SNR} \quad (15)$$

또한 UCA의 반지름 R을 배열안테나 거리 L로 변환하면 $L = 2R \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)$ 이므로

$$\sigma_\psi^2 = \frac{2 \sin^2\left(\frac{\pi}{N}\right)}{N \left(\frac{\pi L}{\lambda}\right)^2 \cos^2(\theta)} \frac{1}{2SNR} \quad (16)$$

표준편차를 구하면 식(17)와 같다[10,11].

$$\sigma_\psi = \frac{\sqrt{2^* N} \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}{\left(\frac{N\pi L}{\lambda}\right) \cos(\theta)} \sqrt{\frac{1}{2SNR}} \quad (17)$$

위상차 계산값을 저장하는 보상메모리 구성을 Fig. 2와 같이 방위각 간격 Δ_ψ , 고각 간격 Δ_θ , 방위각 저장순서 i , 고각 저장순서를 j 로 표기하면 보상메모리에 저장되는 위상차는 식 (18)과 같다. 따라서 위상차 표시분해능 오차는 360° 위상차를 몇 비트데이터로 저장하는지에 따라 변하는 일종의 샘플링 비라고 볼 수 있다.

$$\phi_{k,k+1}^{(i,j)} = \frac{2\pi L}{\lambda} \cos(i\Delta_\theta) \sin\left(j\Delta_\psi + \frac{(k-1)2\pi}{N}\right) \quad (18)$$

방위각이 ψ_e , 고각이 θ_e 이면 보상메모리 분해능에 의해서 발생하는 고각표시 분해능오차 $\varepsilon_\theta^{(i)}$, 방위각표시 분해능오차 $\varepsilon_\psi^{(j)}$ 는 다음과 같다.

$$\varepsilon_\theta^{(i)} = \theta_e - i\Delta_\theta \quad (19)$$

$$\varepsilon_\psi^{(j)} = \psi_e - j\Delta_\psi \quad (20)$$

식 (17)에 방위각 관련 위상차표시분해능 오차를 추가하면 식 (21)과 같다[10].

$$\sigma_{\psi} = \frac{\sqrt{2^*N} \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}{\left(\frac{N\pi L}{\lambda}\right) \cos(\theta) \cos^2(\epsilon_{\psi}^{(j)})} \sqrt{\frac{1}{2SNR}} \quad (21)$$

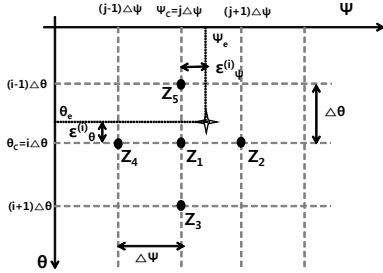


Fig. 2. Correlative DF Interpolation from the Calibration table[9].

3. 시뮬레이터 구성

3.1 시뮬레이터 구성 요소

방탐 시뮬레이터는 Fig. 3과 같이 송신기에서 출력되는 신호가 방탐 수신기에 입력될 때 수신기의 잡음 크기, 보상메모리 간격, 안테나 배치, 방탐 알고리즘 등에 의해서 정확도가 계산 될 수 있도록 설계되었으며 고려할 주요 항목을 다음과 같이 7개로 정리할 수 있다.

- 1) 송신기의 RF 주파수(f)와 송신기 유효방사 출력 (ERP: effective radiation power)
- 2) 송수신기의 거리(R)와 전파의 전파 조건
- 3) 방탐 수신 안테나 이득(Gr)
- 4) 방탐 안테나 3차원 설치좌표
- 5) 안테나 배치에 따른 플랫폼의 전파 간섭
- 6) 수신기의 수신신호 대역폭
- 7) 방향탐지 정확도 계산 알고리즘

3.2 신호잡음비 계산

방탐정확도에 영향을 미치는 방탐 수신기의 신호잡음비는 수신기에 입력되는 송신신호와 수신기 내부의 열잡음과 수신기 시스템의 잡음지수에 의해서 대부분 결정된다. Fig. 3과 같은 송신 신호원과 방탐 수신기 구조에서 신호세기 S_{RX} 와 잡음 N_0 은 일반적으로 다음과 같이 적용한다.

방탐 수신기 안테나 전단에 도달한 유효신호세기는 송신기의 유효복사출력 P_t , 안테나 이득 G_t , 송수신 거

리 R , 파장을 λ , 수신안테나 이득을 G_r 이라하면 식 (22)와 같이 구할 수 있다[12].

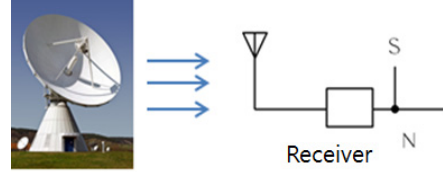


Fig. 3. Signal Power of DF Receiver.

$$S_{ant} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} = \frac{ERP}{4\pi R^2} \quad (22)$$

또한 방탐 안테나에 송신신호가 도달할 때 방탐 수신기의 설치 구조물과 방탐 수신안테나 상호 간섭에 의한 손실이 발생하는데 이는 플랫폼을 모델링하여 수치해석 기법을 이용하여 계산할 수 있다. 만약 수신 안테나 전단에 1 V/m 전계를 입력하고 k 번째 안테나 설치지점의 수신전계 V_{rk} 를 측정하였다고 하면, 공기의 임피던스를 377 Ω , 수신기의 임피던스를 50 Ω 으로 적용하면, 수신기의 전력은 $1^2/377 : V_{rk}^2/50$ 의 비율로 감소한다. 따라서 k 번째 안테나 수신기의 수신신호 세기 S_{RX} 는 식 (22)를 이용하여 식 (23)과 같이 유도할 수 있다[12,13].

$$S_{RX} = \frac{ERP}{4\pi R^2} \frac{V_{rk}^2}{50} \frac{1}{377} \quad (23)$$

V_{rk} 값은 구조물의 영향을 많이 받으므로 실제 플랫폼에 안테나를 설치하고 그 값을 측정하는 것이 정확하지만 대형 플랫폼인 경우 측정에 어려움이 있어서 플랫폼을 모델링 한 후에 모멘트방법, GTD, UTD 등 수치해석 방법을 이용해서 대부분 계산한다.

수신기의 잡음신호는 열잡음이 중요한 요소이며 볼츠만 상수를 K , 수신기 절대온도를 T , 수신기 대역폭을 B , 수신채널 잡음지수를 F 라 두면 식 (24)와 같이 구할 수 있다. 또한 상온에서 대역폭을 1 MHz, rF를 1로 두면 잡음크기는 식 (25)와 같이 된다[14].

$$N_0 = KTB F \quad (24)$$

$$N_0 = -114dBm (@1MHz, 상온, F=1) \quad (25)$$

방탐 수신기의 신호잡음비(SNR)는 식 (23), (24)를 이용하여 식 (26)과 같이 구할 수 있다.

$$SNR = \frac{S_{RX}}{N_0} = \frac{ERP \cdot 377}{4\pi R^2} \frac{V_{\tau k}^2}{KTBF} \quad (26)$$

3.3 알고리즘 구현

알고리즘은 식 (21)로 유도된 방탐 오차를 구하는 것으로 3.1절의 7개의 주요구성요소를 Fig. 4와 같이 모듈화 개념을 도입하여 1) 입력 요소 설정 2) 플랫폼 효과를 고려한 수치해석 결과 입력 3) 오차 계산 4) 결과표시 순으로 설계하였다.

3.4 GUI 설계

그래픽 사용자 인터페이스(GUI)의 데이터 입력부분은 Fig. 5와 같이 입력요소별 팝업 창을 두었으며, 수치해석 자료와 같이 용량이 큰 입력데이터는 파일 단위로 입력할 수 있게 구현하여 데이터 입력시간 단축과 정확도를 높이는 방향으로 구성하였다.

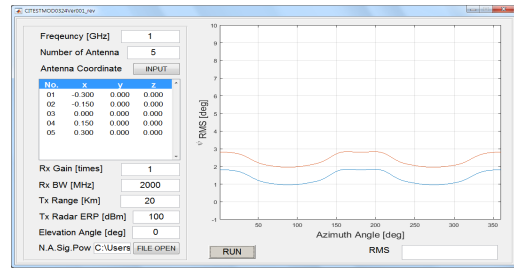


Fig. 5. GUI of the simulator

데이터 출력부분은 Fig. 5에서 보는 것과 같이 수평축에는 플랫폼의 방위각을, 수직축에는 평균 방탐오차를 표시해서 안테나 설치 위치에 따른 방위각별 방탐 정확도를 정확하게 볼 수 있도록 구현하였다[15].

4. 결론

본 논문의 상관형 위상비교 방향탐지장치의 오차 분석용 시뮬레이터는 전파의 주파수, 방탐장치의 안테나 수, 안테나 설치점 좌표, 전파의 송신신호 세기, 수신기대역폭, 방탐장치의 이득과 플랫폼의 전파환경을 고려한 수치해석 데이터를 파일로 입력받아서, 알고리즘을 이용하여 방탐 정확도를 계산한 다음에 0-360도 방위 각과 0-60도 고각에 대한 방향탐지 정확도를 표시하였다. 본 시뮬레이터는 플랫폼에 의한 전파환경 간섭을 정확하게 고려할 수 있어서 함정이나 항공기 등 대형 플랫폼 안테나 배치와 방향탐지 정확도 예측에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Stephen E. Lipsky, *Microwave Passive Direction Finding*, A Wiley-Interscience Publication, New York, 1987.
- [2] David Adamy, *EW101 A first Course in Electronic Warfare*, Artech House, Boston, 2001.

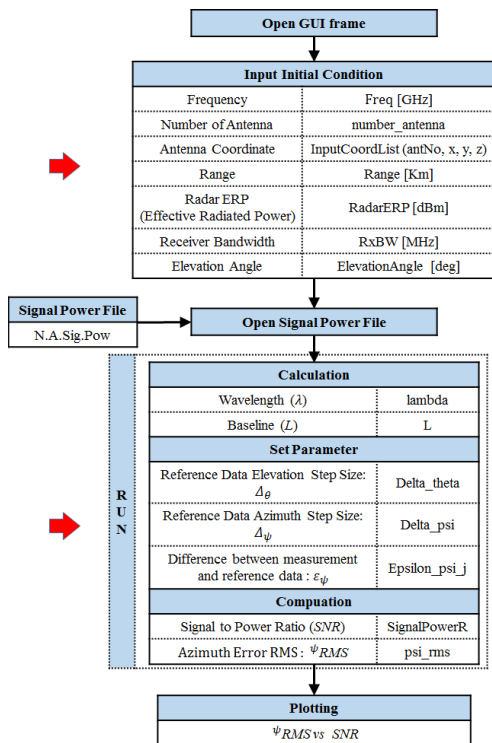


Fig. 4. Algorithm of the simulator

[3] Filippo Neri, *Introduction to electronic Defense Systems*, 2nd ed., Artech House, Boston, pp. 324-330, 2001.

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

[5] G. D. Curtis Schleher, *A Electronic Warfare in the Information Age*, Artech House, Boston, pp. 310-320, 1999.

[6] J. S. Lim and G. S. Chae, "Analysis of Direction Finding Accuracy for Amplitude-Phase Comparison and Correlative Interferometer Method," *Journal of the Society of Digital Policy & Management*, Vol. 14, No. 1, pp. 195-201, Jan. 2016. DOI: 10.14400/JDC.2016.14.1.195

[7] L. Qin, K. Jia, Z. He, "Performance analysis of correlative interferometer direction finder using cosine function," *Proceedings of the 2010 Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pp. 1-4, 2010. DOI: 10.1109/ISPACS.2010.5704777

[8] H. W. Wei and Y. G. Shi, "Performance analysis and comparison of correlative interferometers for direction finding," *Proceedings of the 2010 IEEE 10th International Conference on in Signal Processing*, pp. 393 - 396, Oct. 2010. DOI: 10.1109/ICOSP.2010.5657185

[9] Y. H Kim, J. S. Lim, G. S. Chae and K. C. Kim, "An investigation of the Azimuth Error for Correlative Interferometer Direction Finding," *Journal of the Korea Convergence Society*, Vol. 6, No. 5, pp. 249-255, May. 2015. DOI: 10.15207/JKCS.2015.6.5.249

[10] Andrea De Martino, *Introduction to Modern EW Systems*, Artech House, Boston, pp. 221-244, 2012.

[11] Libero Dinoi, Antonio Di Vito, Graziano Lubello, "Direction Finding of ground based emitters from airborne platforms," *Proceeding of the 2008 IEEE Radar Conference*, pp. 1-6, 2008. DOI: 10.1109/RADAR.2008.4720755

[12] I. G. Lee and D. C. Park. *Radar Engineering and Applications in Electronic Warfare*, Dae-young Sa, pp. 173-184, 2006.

[13] E. G. Lim, Z. Wang and S. H. Lee, "Wearable antenna for Body area Network," *Journal of the SMB Convergence Society*, Vol. 3, No. 2, pp. 27-32, Jun. 2013.

[14] K. Chang, *RF and Microwave Wireless Systems*, Wiley-Interscience, pp. 175-183, 2014.

[15] J. S. Lim, "Data Convergence of Circular Array Correlative Interferometer Direction finding with 7-Antenna," *Journal of the Korea Convergence Society*, Vol. 8, No. 11, pp. 1-6, 2017. DOI: 10.15207/JKCS.2015.6.5.249

저 자 소 개

임 중 수(Joong-Soo Lim)

[정회원]

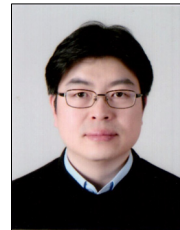


- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1994년 3월 : Auburn University 전기공학과(공학박사)
- 1980년 8월~2003년 12월 : 국방과학연구소

▪ 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
 <관심분야> : 전자과 이론, 방향탐지장치 설계, 전자전 장비, 레이더

김 영 호(Young-Ho Kim)

[정회원]



- 1995년 8월 : 홍익대학교 일반대학원 전자공학과 (전자공학석사)
- 2016년 2월 : 홍익대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 강사

<관심분야> : 방향탐지기법, 시스템융합, 알고리즘분석

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