

진폭-위상 복합비교 기법과 상관형 위상비교 기법의 방향탐지 정확도 분석

임중수*, 채규수**
백석대학교 정보통신학부/전자전특화센터***

Analysis of Direction Finding Accuracy for Amplitude-Phase Comparison and Correlative Interferometer Method

Joong-Soo Lim*, Gyoo-Soo Chae**

Division of Information & Communication Eng., Baekseok University/EWRC***

요약 본 논문에서는 진폭-위상 복합비교 방향탐지 방식과 상관형 위상비교 방향탐지 방식의 방향탐지 정확도에 대해서 기술하였다. 복합비교 방식은 지향성 빔 특성을 갖는 스파이럴 안테나를 사용하고 상관형 방식은 블레이드 안테나를 사용하여 방위각 360°를 동시에 탐지할 수 있는 균일원형배열(UCA: uniform circular array) 구조로 안테나를 배치하고 방위각의 방향탐지 정확도를 분석하였다. 3개의 안테나를 배치하는 경우 신호잡음비(SNR)가 20dB이고 파장에 대한 안테나 사이의 거리(D/λ)가 0.5인 경우 복합비교 방식은 방향탐지 정확도가 4.0°, 상관형 위상비교 방식은 방향탐지 정확도가 1.8°로 나타나서 상관형 위상비교 방식이 정확도가 높은 것을 확인하였다.

주제어 : 방향탐지, 인터페로메터, 상관형 인터페로메터, 신호위상, 신호세기

Abstract In this paper, we present the direction finding accuracy of correlative interferometer method and amplitude-phase comparison method. Spiral antennas are used for amplitude-phase comparison method and blade antennas are used for correlative interferometer method. Those are made for uniform circular array (UCA) direction finding antenna systems. We simulate the accuracy of azimuth angle with 3 antennas UCA when SNR is 20 dB and baseline is 0.5 wave length. Correlative interferometer method has better accuracy than amplitude-phase comparison method.

Key Words : Direction finding, Interferometer, Correlative interferometer, Phase, Amplitude

1. 서론

전파감시나 조난구조 등에 사용되는 지상 또는 항공기 탑재 전파 방향탐지 장비는 넓은 지역에서 일어나는

사고를 신속하게 감지하여 사고지점의 방향과 위치를 찾아야 한다. 특히 조난사고나 불법 전파 사용 등은 짧은 시간에 상대방 송신기에서 방사되는 전파를 수신하여 전파방향 및 위치를 찾아야 한다. 이처럼 자체적으로 송신

* This work was supported by 2015 Baekseok University research fund.

Received 30 November 2015, Revised 30 December 2015

Accepted 20 January 2016, Published 28 January 2016

Corresponding Author: Gyoo-Soo Chae(Baekseok University)

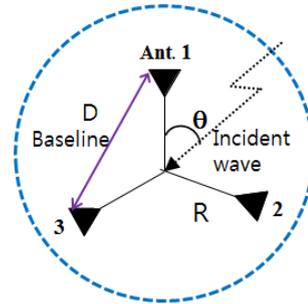
Email: gschae@bu.ac.kr

© The Society of Digital Policy & Management. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

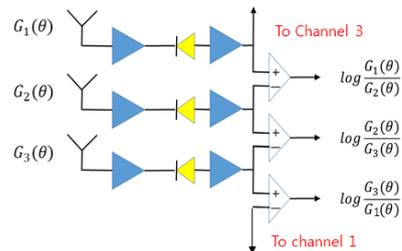
신호를 발사하지 않고 상대방에서 송신한 신호를 수신만 하는 진폭 방향탐지 방법을 수동형(passive) 방향탐지라 부르며, 레이더처럼 전파를 송수신하면서 목표물을 찾는 방법을 능동형(active) 방향탐지라 부른다.

수동형 방향탐지 방법에는 상대방 송신기에서 방사되는 신호의 크기, 위상, 전파시간, 주파수 편이 등을 분석하여 송신기의 방향을 찾는 진폭비교 방향탐지, 위상비교 방향탐지, 시간차 방향탐지, 주파수 편이 방향탐지 등이 있다. 특히 방향탐지 정확도를 개선하기 위해서 진폭-위상 복합 방향탐지, 상관형 위상비교 방향탐지, MUSIC(multiple signal classification) 방향탐지 등이 사용되고 있다[1,2,3,4].

본 논문에서는 방위각 360°를 동시에 탐지할 수 있고 방향탐지 정확도가 높아서 최근에 많이 연구되고 있는 균일원형배열(UCA: uniform circular array) 상관형 위상비교 방향탐지 기법을 현재 많이 사용되고 있는 UCA 진폭-위상비교 복합 방향탐지 기법과 비교하여 방위각 중심으로 방향탐지 정확도를 분석하였다.



[Fig. 1] Direction finding system with uniform circular array using three elements



[Fig. 2] Amplitude comparison circuit for the direction finding system

2. 진폭-위상 복합비교 방향탐지 기법

2.1 진폭비교 방향탐지

3개의 스파이럴 안테나를 사용하여 360°를 감시하는 진폭비교 방향탐지 장치의 UCA 안테나 배열은 [Fig. 1]과 같다. [Fig. 1]에서 안테나 사이거리는 D, 중심에서 안테나 거리는 R이고, 0°에서 120° 방향에서 입사되는 전파의 방향은 안테나 1과 2에 수신되는 전파의 진폭을 비교하여 측정하고, 121°에서 240° 방향에서 입사되는 전파의 방향은 안테나 2와 안테나 3에서 수신되는 전파의 진폭을 비교하고, 241°에서 360° 방향에서 입사되는 전파의 방향은 안테나 3과 1에서 수신되는 전파의 진폭을 이용하여 전파방향을 측정한다.

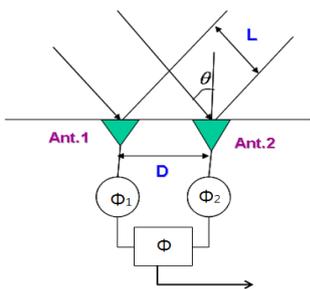
각 안테나에 수신되는 신호의 진폭비교회로는 [Fig. 2]와 같이 각 안테나에 입사되는 신호크기를 $G_1(\theta)$, $G_2(\theta)$, $G_3(\theta)$ 라 하면 이웃하는 두 안테나 신호의 크기를 로그함수로 비교하여 전파의 입사 방위를 계산한다.

2.2 위상비교 방향탐지

위상비교 방향탐지 장치는 [Fig. 3]과 같이 잘 정합된 두 개의 안테나와 위상비교기(phase comparator)이다. 두 채널의 안테나로 수신된 전파는 위상 비교기로 전달되고, 여기서 전파의 입사 방향에 따른 상대적인 위상차를 측정한다. 두 안테나의 전기적 중심을 잇는 선을 기준선(baseline)이라 부르며, 기준선의 길이가 는 D이고, 전파의 입사방위가 θ 일 때, 입사신호의 파장 λ 일 때, 두 안테나에서 측정되는 위상차 ϕ 는 식 (1)과 같이 구할 수 있다[5,6].

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} D \cdot \sin\theta \tag{1}$$

식 (1)에서 전파의 입사 방위 θ 는 식 (2)와 같이 유도할 수 있다. 또한 입사방위 오차, 즉 방향탐지 정확도 θ_e 는 식 (1)을 방위각 θ 에 대해 편미분하면 식 (3)과 같이 되며, 여기에서 ϕ_e 는 위상오차이다.



[Fig. 3] Phase comparison direction finding system

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\phi\lambda}{2\pi D}\right) \tag{2}$$

$$\theta_e = \phi_e \left(\frac{\lambda}{2\pi D \cos\theta}\right) \tag{3}$$

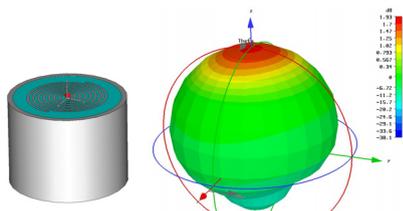
일반적으로 신호세기에 따른 위상오차는 신호잡음비 (SNR)를 사용하며 표시하며 위상비교 방향탐지에서는 식 (4)와 같이 주어진다[3]. 따라서 식 (4)를 식 (3)에 대입하여 위상오차에 대한 방향탐지 정확도를 구하면 식 (5)와 같다.

$$\phi_e = \frac{1}{\sqrt{SNR}} \tag{4}$$

$$\theta_e = \frac{\lambda}{2\pi D \cos\theta \sqrt{SNR}} \tag{5}$$

2.3 진폭-위상 복합비교 방향탐지

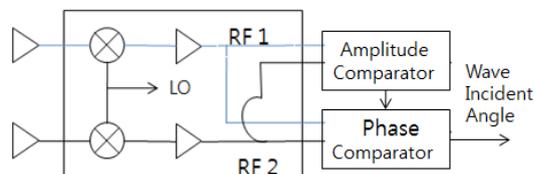
초고주파 대역의 전파를 사용하는 진폭-위상 복합비교 방향탐지 방식에 사용되는 안테나는 30° 이상 넓은 빔폭을 갖는 지향성 안테나가 필요하다. 이러한 특성을 지니고 있는 안테나는 혼(horn) 안테나와 스파이럴 (spiral) 안테나, 노치(notch) 안테나 등이 있으며, 스파이럴 안테나는 광대역 주파수 수신에도 적합하여 특히 많이 사용되고 있다. [Fig. 4]에서는 광대역 스파이럴안테나 모양 및 방사패턴이 나타나 있다.



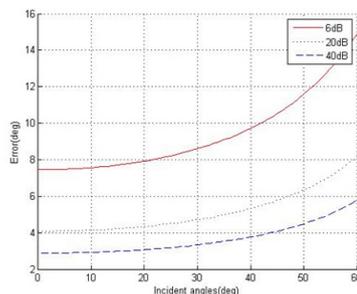
[Fig. 4] The geometry and radiation pattern of a cavity backed spiral antenna

진폭-위상 복합비교 방식은 앞에서 설명한 두 가지 방법을 동시에 사용하는 방법으로 장치 구성도는 [Fig. 5]와 같다. 송신기의 방향을 진폭비교 방법으로 대략 (coarse)방위각을 찾은 후 위상비교 방법으로 정밀(fine)방위각을 구하는 방법이다. 이 방법은 [Fig. 1]과 같이 동일 안테나를 이용하여 위상비교와 진폭 비교 신호를 동시에 수신하며, 위상 비교 방법에서 안테나 기준선이 0.5 파장 이상일 경우에 발생하는 동일 위상차에 대해서 다수 방위각이 계산되는 모호성(ambiguity) 문제를 진폭비교 방법으로 해결하는 장점을 가지고 있다.

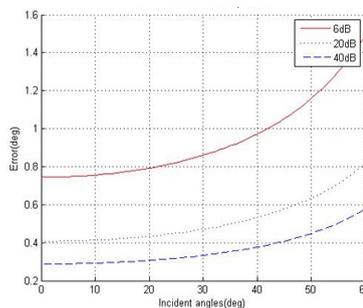
[Fig. 6]은 입사신호의 파장이 1m 이고, 기준선의 길이가 0.5m, 5m 인 경우, SNR이 각각 6dB, 20dB, 40dB 일 때 입사 방위각에 대한 방위 오차 이다.



[Fig. 5] Combined direction finding system



(a) D=0.5m and λ=1m



(b) D=5m and λ=1m

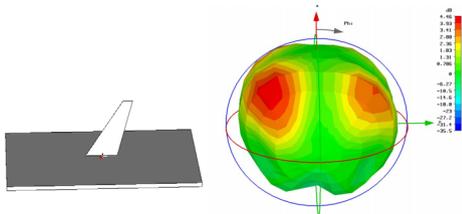
[Fig. 6] Combined direction finding error

3. 상관형 위상비교 방향탐지 기법

3.1 무지향성 방향탐지 안테나

3개의 안테나를 사용하는 상관형 위상비교 방향탐지 장치의 안테나 배치는 [Fig. 1]의 복합비교 안테나 배치와 동일한 구조를 사용할 수 있다. 그러나 상관형 위상비교 방향탐지 장치인 경우 각 안테나는 360° 전방향에서 신호를 수신하여 이웃 안테나와 위상을 비교해야하므로 360° 전체 방향에서 신호를 수신할 수 있는 무지향성 안테나를 사용해야 한다.

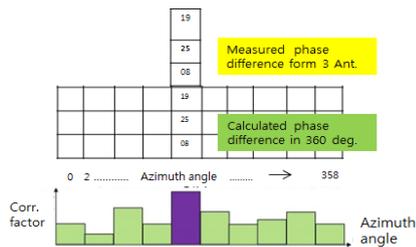
초고주파 대역에서 사용하는 무지향성 안테나는 다이폴 안테나, 모노폴 안테나, 블레이드(blade) 안테나, 코니컬 안테나 등이 있으나 구조가 간단한 블레이드 안테나가 많이 사용된다. [Fig. 7]은 블레이드 안테나의 모양과 방사패턴이다. 전 방향 방사특성을 보이고 있음을 알 수 있다.



[Fig. 7] Blade antenna and radiation pattern

3.2 상관형 위상비교 방향탐지 원리

상관형 위상비교 방향탐지는 [Fig. 8]과 같이 360° 전방향 입사신호에 대해서 1-2번, 2-3번, 3-1번 안테나 쌍의 위상차를 계산하여 보상메모리(또는 위상차저장메모리)에 저장하여 둔 후에, 실제 운용환경에서 입사된 전파의 위상차를 1-2번, 2-3번, 3-1번 안테나 쌍에서 측정하여, 보상메모리의 위상차와 비교하여 상관관계가 가장 큰 보상메모리의 방위각을 입사전파의 방향으로 추정하는 방식이다[7,8,9,10,11].



[Fig. 8] Correlative interferometer concept

상관형 방향탐지 장치가 [Fig. 1]와 같이 3 개 안테나가 반경이 R인 원형배열형태로 구성되어 있고, 전파가 방위각 θ 방향에서 입사한다고 하면 k번째 안테나와 UCA의 중심점에 도달하는 전파의 위상차 ϕ_k 는 다음과 같다 [12,13,14,15].

$$\phi_k = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\left(\frac{(k-1)2\pi}{3} - \theta\right) \quad (6)$$

여기서 k는 배열 안테나 번호이며 $k=1,2,3$ 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 ϕ_k 와의 관계는 다음과 같다.

$$\hat{\phi}_k = \phi_k + \Delta\phi_k = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\left(\frac{(k-1)2\pi}{3} - \theta\right) + \Delta\phi_k \quad (7)$$

식 (6), (7)을 이용하여 cosine 함수를 사용하는 상관함수 $J(\theta)$ 를 구하면 식 (8)과 같다.

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^3 \cos(\phi_k - \hat{\phi}_k) \quad (8)$$

상관형 위상비교 방향탐지에서 추정방위각 $\hat{\theta}$ 는 진방위각 θ 와 방향탐지 오차 $\Delta\theta$ 의 합으로 식 (9)와 같으며, 이 값은 식 (10)과 같이 상관함수 $J(\theta)$ 가 최대가 되는 방위각이 된다.

$$\hat{\theta} = \theta + \Delta\theta \quad (9)$$

$$\hat{\theta} = \arg \max J(\theta) \quad (10)$$

방향탐지 오차 $\Delta\theta$ (또는 σ_θ)는 식 (11)과 같이 구해지며, 여기에서 M은 안테나 개수 이므로 본 논문의 경우는 3이 된다.

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma_\phi^2}{M \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2} = \frac{\sigma_\phi^2}{3 \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2} \quad (11)$$

위상비교 방향탐지에서 $\sigma_\theta^2 = 1/2SNR$ 을 많이 적용하
므로 식 (11)은 식 (12)와 같이 된다.

$$\sigma_\theta^2 = \frac{2}{3 \left(\frac{2\pi R}{\lambda} \right)^2} \frac{1}{2SNR} \quad (12)$$

[Fig. 1]에서 UCA의 반지름 R을 배열안테나 거리 D
로 변환하면 $D = 2R\sin(\pi/3)$ 이므로 식 (12)는 다음과 같
이 표현된다.

$$\sigma_\theta^2 = \frac{2\sin^2\left(\frac{\pi}{3}\right)}{3 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2} \frac{1}{2SNR} \quad (13)$$

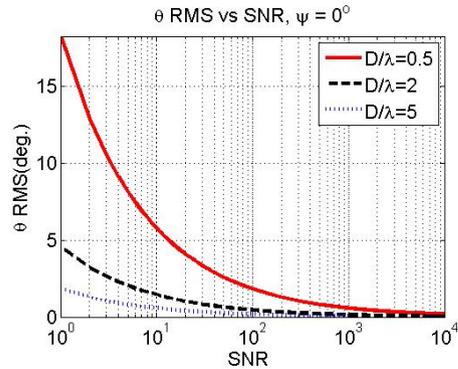
따라서 방향탐지 오차는 식 (13)과 같이 구할 수 있다.
또한 방향탐지 장치와 송신기 사이에 고각(또는 양각)이
 ψ 인 경우 식 (14)는 식 (15)와 같이 확장된다[7].

$$\sigma_\theta = \frac{\sqrt{6} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}{\left(\frac{3\pi D}{\lambda}\right)} \sqrt{\frac{1}{2SNR}} \quad (14)$$

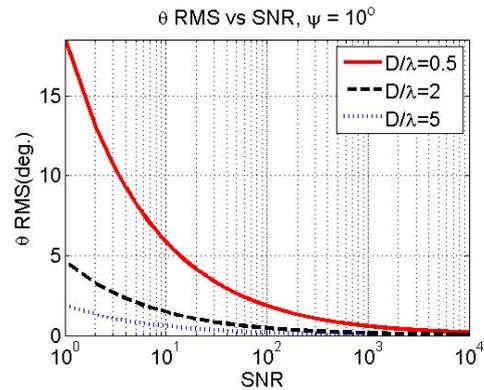
$$\sigma_\theta = \frac{\sqrt{6} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}{\left(\frac{3\pi D}{\lambda}\right) \cos\psi} \sqrt{\frac{1}{2SNR}} \quad (15)$$

[Fig. 9]는 고각이 0° 인 경우 상관형 위상비교 방향탐
지 오차를 시뮬레이션 한 결과이다. SNR이 20dB이고 파
장에 대한 안테나 사이의 거리(D/λ)가 0.5, 2.0, 5.0인 경
우 방향탐지 오차는 1.8° , 0.6° , 0.2° 이다[14].

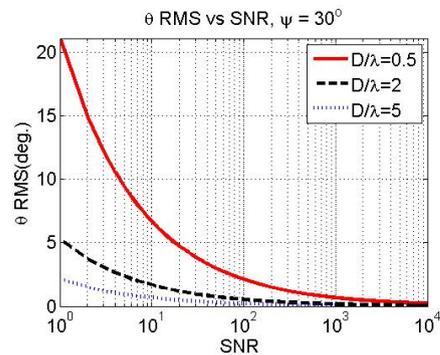
[Fig. 10]과 [Fig. 11]은 고각이 10° , 30° 인 경우 SNR 에
대한 방위각 탐지오차를 시뮬레이션 한 결과들이다.
SNR이 20dB이고 파장에 대한 이웃안테나 사이의 거리
(L/λ)가 0.5, 2.0, 5.0인 경우 방위각오차는 1.9° , 0.6° , 0.2°
과 2.1° , 0.7° , 0.3° 이다.



[Fig. 9] Azimuth Angle Error(elevation angle 0°)



[Fig. 10] Azimuth Angle Error(elevation angle 10°)



[Fig. 11] Azimuth Angle Error(elevation angle 30°)

4. 결론

본 논문에서는 진폭-위상 복합비교 방향탐지 방식과
상관형 위상비교 방향탐지 방식의 방향탐지 정확도에 대

한 연구가 수행되었다. 복합비교 방식에는 지향성 빔 특성을 갖는 스파이럴 안테나가 많이 사용되고 상관형 방향탐지에는 블레이드 안테나가 많이 사용되어서 상대적으로 복합방향탐지 방식이 안테나 이득은 높게 나타난다. [Fig. 1]과 같은 3개의 안테나를 UCA방식으로 배치하는 경우 방위각 정확도를 분석한 결과, SNR이 20dB이고 파장에 대한 안테나 사이의 거리(D/λ)가 0.5인 경우 복합비교 방식은 방향탐지 정확도가 4.0° , 상관형 위상비교 방향탐지 방식은 방향탐지 정확도가 1.9° 로 나타났다. 상관형 위상비교 방식은 정확도가 매우 높고 송신기와 방향탐지기 사이에 고도차가 커도 방위각 정확도에 미치는 영향이 작은 우수한 방향탐지 기법인 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by 2015 Baekseok University research fund.

REFERENCES

- [1] Filippo Neri, Introduction to electronic Defense Systems, 2nd ed., Artech House, Boston, 2001, pp. 324-330.
- [2] G. D. Curtis Schleher, A Electronic Warfare in the Information Age, Artech House, Boston, 1999, pp. 310-320.
- [3] Andrea De Martino, Introduction to Modern EW Systems, Artech House, Boston, 2012, pp. 221-244.
- [4] J. S. Lim, "The Direction Finding Error of TDOA Method According to the Antenna Arrangement," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 11, No. 11, pp. 4503-4508, 2010.
- [5] J. S. Lim, "An Accurate Direction Finding Technology Using a Phase Comparison and Time Difference of Arrival," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 12, No. 11, pp. 5208-5213, 2011.
- [6] 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.
- [7] Libero Dinoi, Antonio Di Vito, Graziano Lubello, "Direction Finding of ground based emitters from airborne platforms," *2008 IEEE Radar Conference*, pp. 1-6, 2008.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Y. H Kim, J. S. Lim, G. S. Chae, 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, 2015.

[15] 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.

채 규 수(Chae, Gyoo Soo)



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 12월 : Virginia Tech. 전기 공학과(공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2009년 2월 : Amphenol Mobile, RF manager
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- 관심분야 : 안테나 설계, 초고주파 이론
- E-Mail : gschae@bu.ac.kr

임 중 수(Lim, Joong Soo)



- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과(공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University (공학박사)
- 1980년 8월 ~ 2003년 12월 : 국방과학연구소
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- 관심분야 : 전자파 이론, 광대역 주파수 소자 설계, 레이더 및 전자전 장비 설계/분석
- E-Mail : jslim@bu.ac.kr