

# 7-안테나로 구성된 원형배열 상관형 위상비교 방향탐지의 데이터 융합

임종수\*

백석대학교 정보통신학부

## Data Convergence of circular Array Correlative Interferometer Direction Finding with 7-Antenna

Joong-Soo Lim\*

Division of Information & Communication Eng., Baekseok University

**요약** 본 논문은 7개 안테나로 구성된 원형배열 안테나에 전파가 입사될 때 안테나 상호간의 계산 위상차와 시험 환경에서 측정된 위상차를 데이터 융합하여 전파의 도래 방향을 탐지하는 상관형(correlative) 위상비교 방향탐지에 대하여 기술하였다. 상관형 위상비교 방식은 균일원형배열(UCA: uniform circular array)과 선형 배열 방식이 많이 사용되며, 수식적으로 계산한 위상차 데이터와 시험 환경에서 측정된 위상차 데이터를 상관함수로 데이터 융합하여 전파 입사 방위각을 계산하므로 현재 많이 사용되고 있는 측정위상차비교 방향탐지 방식보다 성능이 우수하다. 수신신호의 신호잡음비(SNR)가 20dB이고 수신신호의 파장에 대한 안테나 상호간 거리( $L/\lambda$ )가 0.5인 경우 상관형 방향탐은 방향탐지 정확도가  $1.7^\circ$  로 나타나서 측정형 위상비교인 경우  $2.5^\circ$  이상인 것과 비교하여 우수한 것이 확인되었으며 전자파신호 감시용, 군사용 방향탐지용에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

• **주제어** : 방향탐지, 위상비교, 블레이드 안테나, 신호위상, 신호세기.

**Abstract** In this paper, we propose a new method for a correlative phase comparison direction finding(DF) which detects the arrival direction of radio waves by data fusing the calculated phase difference and the measured phase difference between the antennas when the radio waves are incident on the circular array antenna composed of 7 antennas respectively. The correlation type phase comparison method uses a uniform circular array(UCA) and a linear array method. The phase difference data calculated formally and the phase difference data measured in the test environment are fused with a correlation function, therefore, it is superior to the currently used phase comparison direction detection method. When the signal-to-noise ratio (SNR) of the received signal is 20dB and the inter-antenna distance to the wavelength of the received signal( $L/\lambda$ ) is 0.5, the accuracy of the correlative DF is  $1.7^\circ$  while measurement phase comparison's is larger than  $2.5^\circ$ , It can be used for electromagnetic signal monitoring and military direction detection.

• **Key Words** : Direction finding, Interferometer, Correlative, Phase, Amplitude.

\*Corresponding Author : 임종수(jslim@bu.ac.kr)

### 1. 서론

전파감시나 군사용으로 많이 사용되는 전파 방향탐지 장비는 넓은 지역에서 송신하는 전파를 신속하게 수신하여 신호지점의 방향과 위치를 찾아야 한다. 이처럼 전파를 자체적으로 송신하지 않고 상대방에서 송신한 신호를 수신하여 상대방의 전파를 탐지하는 방법을 수동형(passive) 방향탐지라 부르고 레이더처럼 전파를 자체적으로 송신한 후에 수신하여 목표물을 찾는 방법을 능동형 방향탐지라고 부른다.

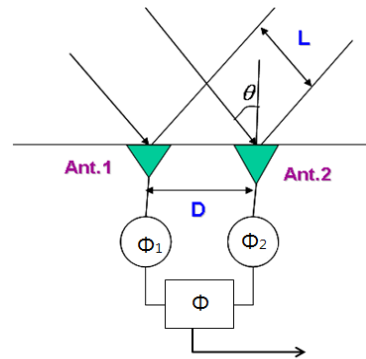
수동형 방향탐지 방법에는 진폭비교 방향탐지, 위상비교 방향탐지, 시간차 비교 방향탐지, 주파수 편이방향탐지, 복합방식 방향탐지 등이 있다[1,2,3]. 본 논문에서는 방위각 360°를 동시에 탐지할 수 있고 방향탐지 정확도가 높아서 최근에 많이 연구되고 있는 균일원형배열(UCA) 상관형 위상비교(interferometer) 방향탐지 기법 중에서 안테나 7 개를 사용하는 경우의 방향탐지 정확도와 특성을 분석하였다.

상관형 위상비교 방식은 균일원형배열(UCA: uniform circular array)과 선형 배열 방식이 많이 사용되며, 수식을 유도하여 계산한 위상차 데이터와 잡음이 있는 시험 환경에서 측정된 위상차 데이터를 cosine 상관함수를 사용하여 데이터 융합을 한 다음에 전파 입사 방위각을 계산하므로 현재 많이 사용되고 있는 측정형 위상차비교 방향탐지 방식보다 입사 방위각 탐지 성능이 우수하여 많이 연구되고 있다.

## 2. 위상비교 방향탐지 기법

### 2.1 측정형 위상비교 방향탐지

선형 위상비교 방향탐지 장치는 [Fig. 1]과 같이 전기적으로 잘 정합된 두 개의 안테나와 위상비교기(phase comparator)로 구성되어 있다. 두 개의 안테나로 수신된 전파는 위상 비교기로 전달되어서 전파의 입사 방향에 따른 두 안테나에 도달한 신호의 상대적인 위상차를 측정한다. 두 안테나의 전기적 중심을 연결하는 선을 안테나 기준선(antenna baseline)이라 부르며, 기준선의 길이가 D, 입사신호의 파장이 λ일 때, 전파의 입사방위각이 θ이면 두 안테나에서 측정되는 신호의 위상차 φ는 식 (1)과 같이 된다[4,5].



[Fig. 1] Linear interferometer direction finding

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

전파의 입사 방위각 θ는 식(1)을 이용하여 식 (2)와 같이 유도할 수 있으며 입사 방위각 오차, 즉 방향탐지 정확도 θ<sub>e</sub>는 식 (2)를 방위각 θ에 대해서 미분을 구하면 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 여기서 φ<sub>e</sub>는 위상오차이다.

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

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

일반적으로 신호세기에 따른 위상오차 φ<sub>e</sub>는 신호잡음비(SNR: signal to noise ratio)를 사용하여 표시할 수 있는데 위상비교 방향탐지 방식에 대해서는 참고문헌[1]에서 φ<sub>e</sub><sup>2</sup> = 1/2SNR 을 적용한다. 따라서 이 값을 식 (3)에 대입하여 방향탐지 정확도를 구하면 식(4)와 같이 된다[6,7].

$$\theta_e = \frac{\lambda}{2\pi D \cos\theta \sqrt{2SNR}} \tag{4}$$

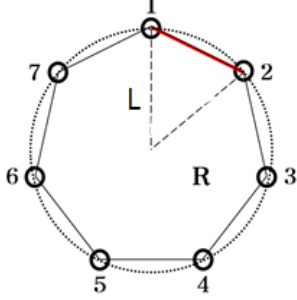
### 2.2 상관형 위상비교 방향탐지

상관형 위상비교 방향탐지는 위상데이터 융합을 위해서 안테나 배치와 사용 주파수, 전파의 입사 방향 등에 따른 안테나 상호간의 위상차를 먼저 유도하여야 한다.

상관형 방향탐지 장치가 [Fig. 2]와 같이 반경이 R인 원주위에 7개의 안테나로 구성되어 있고, 전파가 방위각 θ방향에서 입사한다고 하면 k번째 안테나와 UCA의 중심점에 도달하는 전파의 위상차 φ<sub>k</sub>는 식 (5)와 같이 유도된다[8,9].

$$\phi_k = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\left(\frac{(k-1)2\pi}{7} - \theta\right) \quad (5)$$

여기서  $k$ 는 배열 안테나 번호이며  $k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 이다.



[Fig. 2] 7-antenna Correlative interfero-meter direction finding

식 (5)의 위상차에 잡음이 포함되어 있는 경우 잡음의 크기를  $n_k$ 라 하면 잡음에 의해서 측정위상차가 달라진다. 잡음 환경에서 측정된 위상차를  $\hat{\phi}_k$ 로 정의하고, 잡음에 의한 위상차를  $\Delta\phi_k$ 라고 정의하면 계산 위상차  $\phi_k$ 와  $\hat{\phi}_k$ 의 관계는 식 (6)과 같다.

$$\hat{\phi}_k = \phi_k + \Delta\phi_k = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\left(\frac{(k-1)2\pi}{7} - \theta\right) + \Delta\phi_k \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서 두 위상차의 상관관계를 알기위해서 식 (5)에서 구한 위상차에서 식 (6)에서 구한 위상차를 cosine 함수를 사용하여 데이터 융합 후에 상관함수  $\mathcal{J}(\theta)$ 를 구하면 식 (7)과 같이 되며, 이 값이 클수록 두 값의 상관관계가 크다고 볼 수 있다.

$$\mathcal{J}(\theta) = \sum_{k=1}^5 \cos(\phi_k - \hat{\phi}_k) \quad (7)$$

상관형 위상비교 방향탐지에서 추정방위각  $\hat{\theta}$ 는 진방위각  $\theta$ 와 방향탐지오차  $\Delta\theta$ 의 합으로 식 (8)와 같이 표시할 수 있다. 또한 이 값은 식 (9)과 같이 식 (7)의 상관함수  $\mathcal{J}(\theta)$ 가 최대가 될 때의 방위각이 된다.

$$\hat{\theta} = \theta + \Delta\theta \quad (8)$$

$$\hat{\theta} = \arg \max \mathcal{J}(\theta) \quad (9)$$

방향탐지 정확도  $\theta_e$ (이하  $\sigma_\theta$ 로 표현함)는 식 (6)과 (7)을 이용하여 식 (11)과 같이 구할 수 있다. 여기에서  $M$ 은 UCA에 사용된 안테나 갯수이므로 본 논문의 경우는 7을 적용한다[7].

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma_\phi^2}{\frac{M \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2}{2}} = \frac{\sigma_\phi^2}{\frac{7 \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2}{2}} \quad (10)$$

위상비교 방향탐지방식에서 위상오차는 참고문헌[1]에서  $\phi_e^2 = 1/2SNR$ 을 적용하므로 식 (10)은 식 (11)와 같이 유도된다.

$$\sigma_\theta^2 = \frac{2}{7 \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2} \frac{1}{2SNR} \quad (11)$$

[Fig. 2]에서 UCA의 반지름  $R$ 을 안테나 배열거리  $L$ 로 변환하면  $L = 2R \sin(\pi/7)$ 이므로 식 (11)은 식 (12)와 같이 유도된다.

$$\sigma_\theta^2 = \frac{2 \sin^2\left(\frac{\pi}{7}\right)}{7 \left(\frac{\pi L}{\lambda}\right)^2} \frac{1}{2SNR} \quad (12)$$

따라서 방향탐지 정확도  $\sigma_\theta$ 는 식 (13)과 같이 구할 수 있다. 또한 방향탐지 장치에서 양각을 측정하는 경우 수신 신호의 양각이  $\psi$ 인 경우 양각에 의한 오차  $\cos\psi$ 를 분모에 적용하여 식 (14)와 같이 확장할 수 있다[10,11,12].

$$\sigma_\theta = \frac{\sqrt{14} \sin\left(\frac{\pi}{7}\right)}{\left(\frac{7\pi L}{\lambda}\right)} \sqrt{\frac{1}{2SNR}} \quad (13)$$

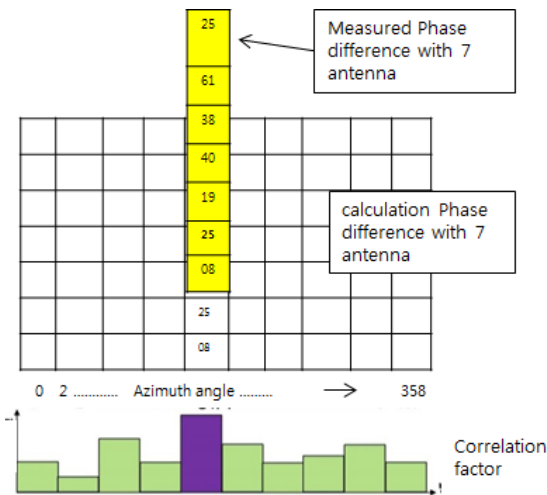
$$\sigma_\theta = \frac{\sqrt{14} \sin\left(\frac{\pi}{7}\right)}{\left(\frac{7\pi L}{\lambda}\right) \cos\psi} \sqrt{\frac{1}{2SNR}} \quad (14)$$

상관형 위상비교 방향탐지의 원리는 [Fig. 3]과 같이 360° 전방향 입사신호에 대해서 1-2번, 2-3번, 3-4번, 4-5번, 6-7번, 7-1번 안테나 쌍의 위상차를 계산하여 ‘위상차 계산값 저장메모리’(보상메모리)에 저장하여 두고, 실제 방향탐지 장치에서 입사된 전파의 위상차를 1-2번, 2-3번, 3-4번, 4-5번, 6-7번, 7-1번 안테나 쌍에서 측정하

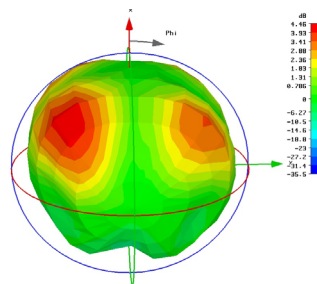
여, 보상메모리의 위상차와 데이터를 비교하여 cosine 함수의 상관관계가 가장 큰 보상메모리의 방위각을 입사전파의 방향으로 추정하는 데이터 융합방식을 사용하므로 측정 위상차만 이용하여 방위각을 계산하는 측정형 위상비교 방식보다 정확도가 우수하여 많이 연구되고 있다 [13,14,15].

### 3. 상관형 위상비교 방향탐지 안테나

7 개의 안테나를 사용하는 UCA 상관형 위상비교 방향탐지 장치의 안테나 배치는 [Fig. 2]와 같이 원주 위에 등간격으로 안테나를 배치하는 간단한 구조이다. 그러나 상관형 위상비교 방향탐지 장치인 경우 각 안테나는 360° 전방향에서 신호를 수신하여 이웃 안테나와 위상을 비교할 수 있어야하므로 360° 전체 방위각에서 신호를 수신할 수 있는 무지향성 안테나를 사용해야 한다.



[Fig. 3] Correlative interferometer concept



[Fig. 4] radiation pattern of Blade antenna

고주파 대역에서 사용하는 무지향성 안테나는 다이폴 안테나, 모노폴 안테나, 블레이드(blade) 안테나, 원추형 안테나, 반 원추형 안테나 등이 있으나 구조가 간단하고 설치가 용이한 블레이드 안테나가 많이 사용된다. [Fig. 4]는 일반적으로 많이 사용하는 블레이드 안테나의 모양과 방사패턴이다.

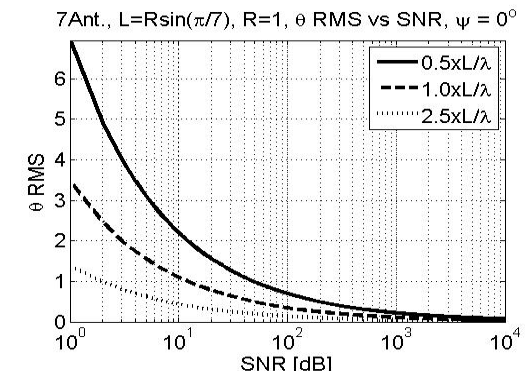
### 4. 상관형 위상비교 기법 모사

데이터 융합을 이용한 상관형 위상비교 기법에 대한 평가는 방향탐지 오차범위로 나타낼 수 있다. [Fig. 5]는 양각이 0°인 경우 상관형 위상비교 방향탐지 오차를 시뮬레이션 한 결과이다. SNR이 20dB이고 파장에 대한 안테나 기준선의 거리(L/λ)가 0.5, 1.0, 2.5인 경우 방향탐지 정확도는 1.7°, 0.8°, 0.3° 이다.

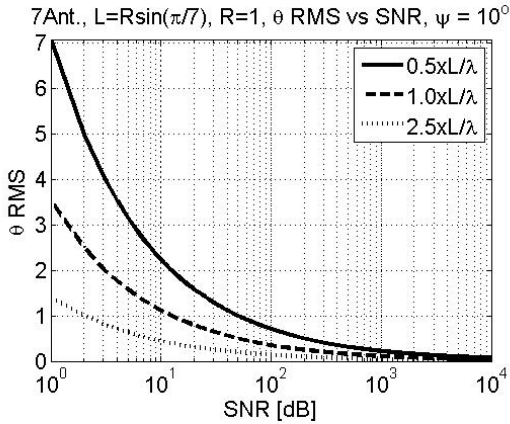
[Fig. 6]과 [Fig. 7]은 양각이 10°와 30°인 경우 SNR에 대한 방위각 탐지정확도를 시뮬레이션 한 결과들이다. SNR이 20dB이고 파장에 대한 안테나 사이의 거리(L/λ)가 0.5, 1.0, 2.5인 경우 방위각정확도는 1.8°, 0.9°, 0.3°와 2.0°, 1.0°, 0.4° 이다.

[Fig. 8]은 양각이 45° 인 경우 상관형 위상비교 방향탐지 정확도를 시뮬레이션 한 결과이다. SNR이 20dB, 안테나 기준선의 거리(L/λ)가 0.5, 1.0, 2.5인 경우 방향탐지 정확도는 2.3°, 1.1°, 0.5° 이다.

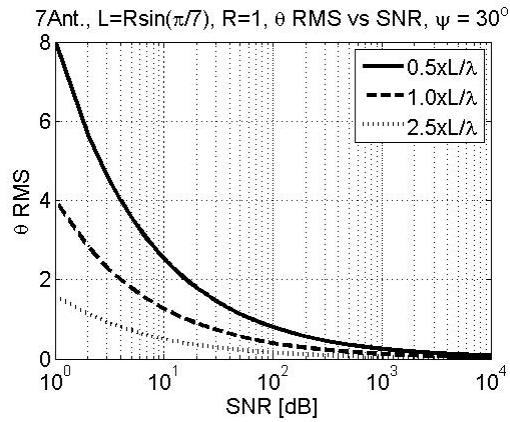
[Fig. 5]~[Fig. 8]의 결과는 안테나 길이에 대한 방위각의 방향탐지 정확도 뿐 만 아니라 양각이 큰 경우에도 방위각의 방향탐지 정확도가 매우 양호한 것을 확인할 수 있다. 이는 측정형 위상 탐지방식이 양각이 커지면 방향탐지 정확도가 급격히 나빠지는 것과는 대조적인 것을 알 수 있다.



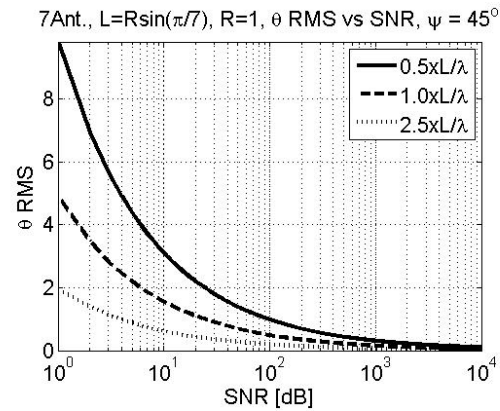
[Fig. 5] Azimuth Angle Error(ψ=0°)



[Fig. 6] Azimuth Angle Error( $\psi=10^\circ$ )



[Fig. 7] Azimuth Angle Error( $\psi=30^\circ$ )



[Fig. 8] Azimuth Angle Error( $\psi=45^\circ$ )

## 5. 결론

본 논문에서는 7 개의 안테나를 UCA방식으로 배치하고 상관형 위상비교방식으로 방향탐지 정확도를 측정할 결과 SNR이 20dB이고  $L/\lambda$ 가 0.5, 1.0, 2.5인 경우 양각이  $0^\circ$ 로 전파가 입사할 때 방위각의 방향탐지 정확도는  $1.7^\circ$ ,  $0.8^\circ$ ,  $0.3^\circ$ 이며, 같은 조건에서 측정형 위상비교 방향탐지 정확도는  $2\sim 5^\circ$  이므로 상관형 위상비교 탐방방식은 정확도가 매우 높다. 또한 [Fig. 5]~[Fig. 8]에서 수신신호 원과 방향탐지장치 사이의 양각이 커도 방위각 정확도에 미치는 영향이 매우 작은 우수한 방향탐지 기법으로 확인되어서 전파감시나 군사용 방향탐지에 잘 활용될 수 있을 것으로 판단되며 방향탐지 정확도 향상을 위해서는 배열 안테나 수와 배치방법에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 사료된다.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by 2016 Baekseok University research fund.

## REFERENCES

- [1] Andrea De Martino, Introduction to Modern EW Systems, Artech House, Boston, 2012, pp. 221-244.
- [2] Joong-Soo Lim, Gyoo-Soo 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, 2016.
- [3] Filippo Neri, Introduction to electronic Defense Systems, 2nd ed., Artech House, Boston, 2001, pp. 324-330.
- [4] G. D. Curtis Schleher, A Electronic Warfare in the Information Age, Artech House, Boston, 1999, pp. 310-320.
- [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] 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.

[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] 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

임 중 수(Joong-Soo Lim)

[종신회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과 (학사)
- 1994년 3월 : Auburn대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 2003년 2월 : 국방과학연구소 책임연구원, 전자전연구실장

- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
  - 2016년 7월 ~ 현재 : 백석대학교 전산정보원장
- <관심분야> : IT융합, 정보통신, 전자기기, 전자전 시스템, 레이더