

# 원형배열 안테나의 위상차 패턴을 이용한 방향탐지 기법

임중수

백석대학교 정보통신학부 교수

## Direction Finding Method of the Uniform Circular Array Antenna Using the Pattern of Phase Differences

Joong-Soo Lim

Professor, Division of Information Communication, Baekseok University

요 약 본 논문에서는 원형배열 안테나의 위상차와 위상차 배열 패턴을 비교하여 전파 신호원의 방향을 찾는 방법을 연구하였다. 위상비교 방향탐지 방식에서는 안테나 기준선 길이가 입사신호의 0.5파장보다 길면 같은 위상차에서 두 개 이상의 방위가 계산되는 방위각 모호성이 발생한다. 본 논문에서는 0-360도 방위각에서 전파 신호가 입사될 때 5개 안테나에서 검출된 위상차 패턴을 융합하여 방위각 모호성을 제거한다. 개발된 모호성 제거 기법은 안테나가 5개인 균일원형배열 구조에서 안테나 기준선이 입사신호의 1.236파장 이하이면 방위각 모호성 없이 방향탐지를 정확하게 수행하였다. 본 알고리즘은 조난구조와 전자정보시스템의 방향탐지 장치 설계에 잘 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 방위각, 방향탐지, 위상비교, 융합, 모호성.

**Abstract** In this paper, we have studied a direction finding method of the radio signal by comparing the phase difference and its pattern from the uniform circular array antenna. In the phase comparison direction finding, if the length of the antenna baseline is longer than 0.5 wavelength of the incident signal, azimuth ambiguity occurs in which two or more azimuth angles are calculated in the same phase difference. The azimuthal ambiguity is removed by fusing the phase difference of the 5 antennas. The developed ambiguity elimination technology reduces the azimuth error where the antenna baseline is shorter than 1.236 wavelength in the uniform circular array with five antennas. This algorithm is very useful for the design of direction finder of an electronic information system.

**Key Words** : interferometer, direction finding, antenna, convergence, ambiguity

### 1. 서론

육상이나 해상, 공중에서 송신되는 전파 신호의 위치와 방향을 신속하게 찾기 위해서는 360도 전방위에서 송신되는 신호를 동시에 탐지할 수 있어야 한다. 따라서 회전식 방향탐지(이하 방탐) 안테나는 사용이 줄어들고 있으며, 안테나 운용방법을 원형배열을 사용하거나, 선형배열 안테나를 여러 개 모아서 360도를 동시에 탐지하는 형

태를 사용한다[1-3].

배열 안테나의 방탐 방법에는 무선신호의 주파수, 진폭, 위상 등을 융합하여 신호의 방향을 찾는 진폭비교 방탐, 위상비교 방탐, 시간비교 방탐, 주파수비교 방탐 등이 있다. 이 중에서 위상비교 방탐은 잡음에 의한 영향이 작고 방탐 정확도가 상대적으로 높아서 많이 사용되고 있다[4-6].

\*This paper was supported by the fund of Baekseok University in 2018.

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

Received October 17, 2018

Accepted January 20, 2018

Revised December 12, 2018

Published January 28, 2018

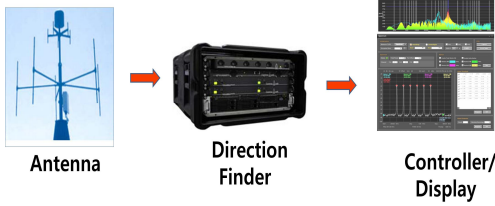


Fig. 1. Interferometer direction finding system with five antenna uniform circular array

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 5개의 안테나를 원형으로 배치하여 방위각 360도를 동시에 탐지할 수 있는 균일 원형배열(uniform circular array : UCA) 구조의 위상비교 방탐에 대해서 기술하며, 안테나 기준선이 입사신호의 1.236과장 이하일 때 위상차 패턴을 사용하여 방위각 모호성을 해결해서 전파신호의 방위각을 신속하게 측정할 수 있는 방법을 제안한다.

현재 사용되고 있는 UCA 안테나구조 방탐 에는 상관형(correlative) 위상비교방식과 MUSIC (multiple signal classification)방식, Averaged MUSIC 방식 등이 있으며 본 논문에서 제안하는 위상차 패턴비교 방식은 앞에서 언급한 세 종류 방식보다 방탐 시간이 매우 빨라서 전자전 장비에 많이 사용되고 있으며, 기존의 위상차 방탐 방식보다는 기준선의 길이가 확장될 수 있어서 방탐 정확도가 높아진다.

## 2. 위상 비교 방향탐지 기법

### 2.1 선형 위상비교 방향탐지

선형 위상비교 방탐은 Fig. 2와 같이 두 개의 안테나와 위상비교기(phase comparator)를 사용하여 두 안테나로 수신된 전파신호의 위상차를 측정하여 전파의 입사방향을 찾는 것이다.

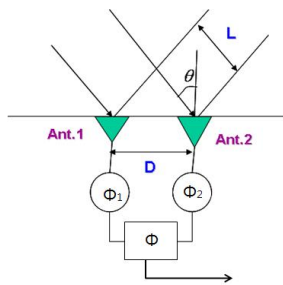


Fig. 2. Phase comparison direction finding device with two antenna channels

Fig. 2에서 안테나의 전기적 중심을 연결하는 가상의 선을 기준선(baseline)이라 부르며, 기준선의 길이가 D인 방탐 장치에 파장이  $\lambda$  인 전파가  $\theta$  방위각에서 입사될 때 두 안테나에 도착하는 전파신호의 위상차  $\phi$  는 식 (1) 과 같이 구할 수 있다[1,7].

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

식 (1)을 이용하여 전파의 입사 방위각  $\theta$  을 식 (2)와 같이 유도할 수 있다. 또한 입사방위 오차, 즉 방탐 정확도  $\theta_e$  는 식 (2)를 입사 방위각  $\theta$  에 대해 미분하여 정리하면 식 (3)과 같으며, 여기서  $\phi_e$  는 위상오차이다.

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

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

Fig. 2와 같은 위상비교 방탐 장치에서는 기준선의 길이가 D가 길어지면 식 (3)에서 보는 바와 같이 방탐 정확도가 좋아지는 장점이 있으나, 기준선이 입사신호의 0.5  $\lambda$  보다 길면 동일한 위상차에 대해 여러개의 입사방위각(direction of arrival)이 계산되는 방위각 모호성(ambiguity)이 발생한다. 현재 사용되는 장비는 기준선 길이가 0.5  $\lambda$  이상이면 기준선 출발점에서 0.5  $\lambda$  위치에 안테나를 추가하여 모호성을 해결하며, 이 경우에는 안테나가 많아져서 구조가 복잡하고 설치비용이 상승한다[8].

본 연구에서는 UCA 구조를 사용하여 안테나 기준선 길이가 0.5  $\lambda$  이상인 경우에도 배열 안테나에 수신된 신호의 위상차 패턴을 융합하여 안테나 추가 없이 방위각 모호성을 제거하는 기술을 개발하였다.

### 2.2 5-안테나로 구성된 UCA 위상비교 방탐

Fig. 3은 0-360도 방향에서 입사되는 신호의 방위각을 측정하는 안테나 배치로 안테나 5개가 일정한 간격으로 원주상에 배치한 UCA 구조이다. 1~2번 안테나의 기준선을 #1 안테나 기준선으로 표시하고, #1 안테나 기준선의 수직방향을 방위각 0°로 정한다. 2~3번 안테나의 기준선, 3~4번 안테나의 기준선, 4~5번 안테나의 기준선, 5~1번 안테나의 기준선을 #2, #3, #4, #5 안테나 기준선으로 정하면, 각 안테나 기준선의 수직방향 각도, 즉 기준선의 기준각도는 72°, 144°, 216°, 288° 가 된다.

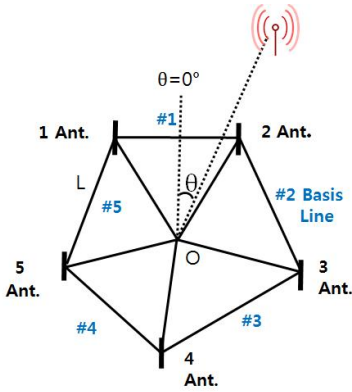


Fig. 3. 5-antenna UCA and antenna baselines

Table 1. Reference azimuth angles of antenna baselines in Fig. 3

Number of Antenna baseline(#)	#1	#2	#3	#4	#5
Ref. angle: $\theta_{Bk}$ (deg.)	0	72	144	216	288

Fig. 3에서 원의 반경이  $R$ , 안테나 기준선이  $L$ , 안테나 번호를  $k$ 라고 하면, 방위각  $\theta$ 에서 신호가 입사될 때,  $k$  번째 안테나와  $k+1$  번째 안테나 입사신호의 위상차  $\phi_{k,k+1}$ 은 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 또한  $\#k$  안테나 기준선에서 위상차를 사용하여 상대 방위각  $\theta_{cal}$ 을 식 (5)와 같이 구할 수 있다[9-11].

$$\phi_{k,k+1} = \frac{2\pi L}{\lambda} \cdot \sin\left(\theta + \frac{(k-1)2\pi}{5}\right) \quad (4)$$

$$\theta_{cal} = \sin^{-1}\left(\frac{\phi_{k,k+1} \cdot \lambda}{2\pi L}\right) \quad (5)$$

Fig. 3과 같은 UCA 구조에서 입사신호의 방위각은 식 (5)을 이용하여 다음과 같은 순서로 계산할 수 있다.

첫째, 5개 안테나 기준선에 전파가 입사될 때 위상차  $\phi_{k,k+1}$ 가 최소가 되는 안테나 기준선 번호(number of antenna baseline)  $\#k$ 와 이때 최소위상차  $\phi_{\min}$ 을 구한다.

$$\phi_{\min} = \min(|\phi_{1,2}|, |\phi_{2,3}|, |\phi_{3,4}|, |\phi_{4,5}|, |\phi_{5,1}|) \quad (6)$$

둘째, 선택된 안테나 기준선을 사용하여 식 (5)을 이용해서 상대방위각  $\theta_{cal}$ 을 구한다.

셋째, 선택된 안테나 기준선의 기준각도  $\theta_{Bk}$ 을 Table 1에서 구한다.

넷째, 신호 입사방위각  $\theta$ 는 안테나 기준선의 기준각도와 상대 방위각의 합으로 구한다.

### 3. UCA 안테나 위상차 융합을 이용한 모호성 제거

Fig. 4에서 방위각  $\theta$ 에서 전파가 입사될 때, #1 안테나 기준선에서 측정된 위상차 즉, 안테나 1과 안테나 2 사이의 위상차를  $\phi_{1,2}$ , #2 안테나 기준선 위상차를  $\phi_{2,3}$ , #3 안테나 기준선 위상차를  $\phi_{3,4}$ , #4 안테나 기준선 위상차를  $\phi_{4,5}$ , #5 안테나 기준선 위상차를  $\phi_{5,1}$ 로 명명하고, 기준선의 길이가  $0.5\lambda$ ,  $1.0\lambda$ ,  $1.236\lambda$ , 그리고  $1.3\lambda$ 인 경우에  $0-360$ 도 방위각에서 전파가 입사될 때 각 안테나 기준선의 위상차 변화의 규칙성을 분석하였다[12,13].

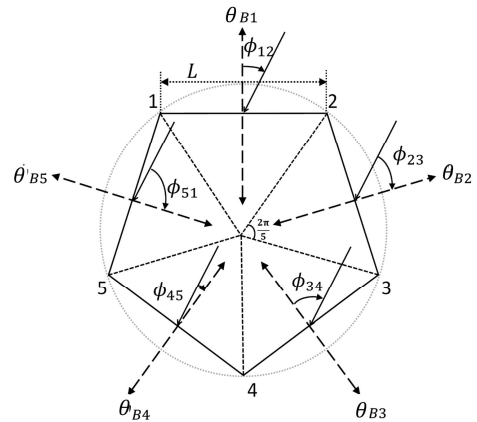


Fig. 4. 5-antenna UCA and phase differences of antenna baselines

Fig. 5는 기준선이  $0.5\lambda$ 인 경우  $0-360$ 도 방향에서 전파가 입사될 때 #1~#5 안테나 기준선의 위상차를 표시하였다. Fig. 5에서 각 기준선의 위상차 크기순서가 일정한 영역을 방위각 기준으로 나누면 @~㉔까지 11개로 영역으로 나누어진다.

Fig. 5에서 11개 영역의 최소방위각과 최대 방위각은 Table 2와 같고, 각 영역에서 5개 안테나 기준선의 위상차가  $+\pi$ 에서  $-\pi$ 로 감소하는 순서를 Table 3에 표시하였다. Table 3에서 밑줄 친 가운데 기준선이 위상차 절대값이 가장 작아서 활동기준선이 되고 방위각 계산에 사용

된다.

Fig. 5에서 #1 안테나 기준선의 위상차가 0.545 radian 경우 식 (2)로 방위각을 구하면 10도(영역 ㉓)와 170도(영역 ㉑) 두 개가 계산되어서 방위각 모호성이 발생한다. 그러나 나머지 안테나 기준선들의 위상차 크기를 분석하면 기준선 번호가 5-4-1-3-2번 순서로 위상차가 작아지므로 Table 3에서 ㉓ 영역과 ㉑ 영역의 위상차가 감소하는 순서를 조사하면 ㉓ 영역의 기준선 위상차가 5-4-1-3-2번 순서로 감소하므로 방위각은 10도인 것을 알 수 있다. 참고로 170도인 경우에는 위상차가 2-3-1-4-5번 순서로 작아지는 것을 볼 수 있다.

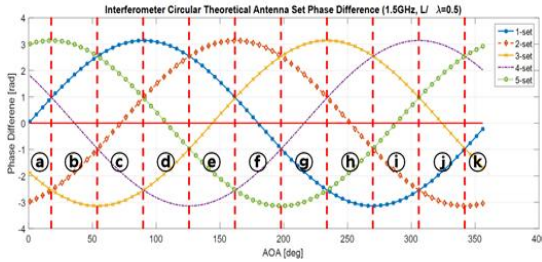


Fig. 5. Phase difference pattern of 5 antenna baselines with  $L=0.5\lambda$

Table 2. Azimuth angle of each part in Fig. 5

part.	㉓	㉒	㉑	㉐	㉏	㉍	㉌	㉋	㉊	㉉	㉈
Azi. -min. (deg.)	0	18	54	90	126	162	198	234	270	306	342
Azi. -max. (deg.)	18	54	90	126	162	198	234	270	306	342	360

Table 3. Number of the baseline into each part of Fig. 5 w.r.t. phase difference

part	㉓	㉒	㉑	㉐	㉏	㉍	㉌	㉋	㉊	㉉	㉈
# of base line	5	5	1	1	2	2	3	3	4	4	5
	4	1	5	2	1	3	2	4	3	5	4
	<u>1</u>	<u>4</u>	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	<u>4</u>	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>1</u>
	3	2	4	3	5	4	1	5	2	1	3
	2	3	3	4	4	5	5	1	1	2	2

Fig. 6, Fig. 7은 안테나 기준선이  $1.0\lambda$ ,  $1.236\lambda$ 인 경우 0-360도 방위각에서 전파가 입사될 때 5개 기준선의 위상차를 표시하고, 각 기준선의 위상차 크기순서가 일정한 영역을 ㉓~㉑까지 11개로 나누었으며 각 영역의 방위각은 Fig. 5와 동일한 것을 알 수 있다

또한 Table 4, Table 5는 Fig. 6, Fig. 7의 11개 영역에서 위상차가  $+2\pi$ 에서  $-2\pi$ 로 감소하는 순서를 표시하였다. Fig. 6, Fig. 7에서 11개 영역에서 위상차 감소순서가 Fig. 5와 같아서 Table 4와 Table 5는 Table 3와 내용이 같다. 따라서 안테나 기준선이  $1.236\lambda$  이하인 경우에는 Table 3을 사용하여 11개 영역에서 위상차가 감소하는 기준선 순서를 이용하여 방위각 모호성을 제거할 수 있다.

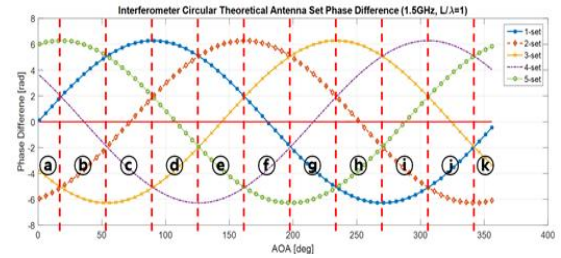


Fig. 6. Phase difference pattern of 5 antenna baselines with  $L=1.0\lambda$

Table 4. Number of the baseline into each part of Fig. 6 w.r.t. phase difference

part	㉓	㉒	㉑	㉐	㉏	㉍	㉌	㉋	㉊	㉉	㉈
# of base line	5	5	1	1	2	2	3	3	4	4	5
	4	1	5	2	1	3	2	4	3	5	4
	<u>1</u>	<u>4</u>	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	<u>4</u>	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>1</u>
	3	2	4	3	5	4	1	5	2	1	3
	2	3	3	4	4	5	5	1	1	2	2

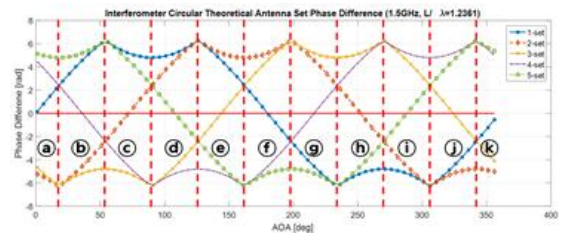


Fig. 7. Phase difference pattern of 5 antenna baselines with  $L=1.236\lambda$

Table 5. Number of the baseline into each part of Fig. 7 w.r.t. phase difference

part	㉓	㉒	㉑	㉐	㉏	㉍	㉌	㉋	㉊	㉉	㉈
# of base line	5	5	1	1	2	2	3	3	4	4	5
	4	1	5	2	1	3	2	4	3	5	4
	<u>1</u>	<u>4</u>	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	<u>4</u>	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>1</u>
	3	2	4	3	5	4	1	5	2	1	3
	2	3	3	4	4	5	5	1	1	2	2

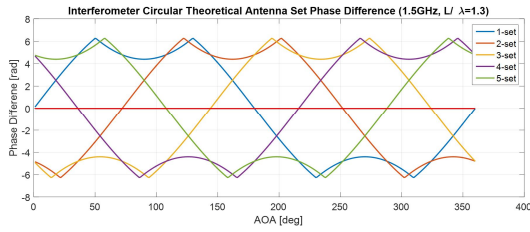


Fig. 8. Phase difference pattern of 5 antenna baselines with  $L=1.3\lambda$ .

그러나 Fig. 8과 같이 기준선이  $1.3\lambda$ 인 경우에는 기준선의 위상차 크기순서가 같은 영역이 11개가 아니라 20개로 변경되어 20개 영역에서 기준선의 위상차가 감소하는 순서를 표시하는 새로운 Table을 만들어서 사용해야 한다. 이처럼 기준선이  $1.236\lambda$  보다 크면 기준선의 위상차 크기 순서가 달라져서 Table 3은 사용할 수 없고 다른 Table을 만들어서 사용해야 한다.

#### 4. 새로운 UCA 방향탐지 알고리즘

본 연구에서 제시하는 방위각 모호성 제거 및 입사신호의 방위각을 추정하는 방법은 Fig. 9와 같으며 다음과 같이 설명할 수 있다.

첫째, 안테나 기준선에서 측정한 위상차를 식 (4)을 이용하여 최소 위상차  $\phi_{min}$  을 구하고, 최소 위상차 기준선을 방위각 계산에 사용할 활동 기준선으로 선택한다.

둘째, 활동 기준선의  $\phi_{min}$  을 사용하여 식 (2)로 계산 방위각  $\theta_{cal}$  을 구한다.

셋째, 활동 기준선이  $1.236\lambda$  이하 경우에 방위각 모호성이 발생하면 Table 3을 이용하여 방위각 모호성을 제거한다.

넷째, Table 1에서 활동 기준선 기준각도  $\theta_{Bk}$  을 구한다.

다섯째, 최종방위각  $\theta$  는 활동 기준선의 기준각도와 계산방위각  $\theta_{cal}$  의 합으로 식 (6)과 같이구할 수 있다[14,15].

$$\theta = \theta_{Bk} + \theta_{cal} \tag{7}$$

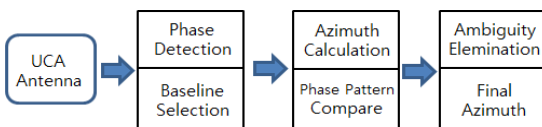


Fig. 9. Azimuth calculation with phase differences and phase patterns of baselines

#### 5. 결론

과거에는 UCA 구조 위상비교 방탐 방법에서 기준선이  $0.5\lambda$  이상인 경우에 발생되는 모호성 제거를 위해서 안테나를 추가하거나 또는 진폭-위상 복합비교 방탐 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 5개 안테나로 구성된 UCA의 위상비교 방탐을 수행하는 경우, 방탐의 5개 안테나 기준선의 위상차 크기 순서를 영역별로 분석하여 기준 Table을 만들고 이것을 이용하여 기준선이  $1.236\lambda$  이하인 경우에는 기준 Table을 사용하여 위상차의 모호성을 제거하고 최종방위각을 정확하게 도출하도록 하였다. 향후에는 기준선이  $1.236\lambda$  이상인 경우에도 방탐 모호성을 제거하는 방법을 연구해야 할 것으로 사료된다.

#### REFERENCES

- [1] Andrea De Martino. (2012). *Introduction to Modern EW Systems*, Artech House, Boston, 221-244.
- [2] Sathish Chandran Editor. (2005). *Advanced in Direction-of-Arrival Estimation*, Artech House, Boston, 241-258.
- [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] Filippo Neri, (2001). *Introduction to electronic Defense Systems, 2nd ed.*, Artech House, Boston, 324-34430.
- [5] G. D. Curtis Schleher. (1999). *A Electronic Warfare in the Information Age*, Artech House, Boston, 361-386.
- [6] J. S. Lim, (2017). Design of Wideband RF Frequency Measurement System with EP2AGX FPGA. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(7), 1-6
- [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] 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.
- [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.

임 중 수 (Joong-Soo Lim)

[중신회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과
- 1994년 3월 : Auburn대학교 공과대학 전자공학과 (공학박사)
- 1994년 1월 ~ 2003년 2월 : 국방과학연구소 책임연구원.

- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- 2003년 3월 ~ 2015년 2월 : 백석대학교 창업보육센터장
- 2016년 7월 ~ 현재 : 백석대학교 전산정보원장
- 관심분야 : ICT융합, 정보통신, 전자기기, 전자전.
- E-Mail : jslim@bu.ac.kr