

TDOA 방위탐지방식의 위치표정 정확도

임종수*, 채규수**

백석대학교 정보통신학부/전자전특화센터***

Position Fixing Accuracy of TDOA Direction Finding Method

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

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

요약 방위탐지기술은 위치표정 정확도를 높이기 위해서 매우 중요하다. 도착시간차(TDOA) 방위탐지 방식은 정확도가 매우 높은 기술이며 1990년대부터 고주파신호 방위탐지에 사용되었다. TDOA 방식은 송신기에서 송신된 신호가 거리가 다른 위치에 있는 두 개의 수신기에 도착하는 시간차를 이용하여 송신기의 방위를 측정하는 방식으로서 수신신호의 신호대잡음비(SNR)와 안테나 기준선이 방위탐지 정확도에 매우 큰 영향을 미치며, 본 논문에서는 SNR과 안테나 기준선에 대한 방위각 정확도와 위치표정 정확도를 모사하였다. 기준선의 길이가 50m이고 SNR이 40dB 이상이면, 입사방위각 0°에서 약 0.51°의 방위탐지 정확도를 얻었다.

주제어 : 위치표정, 방위탐지, 수신신호, 신호대잡음비, 시간차, 위치오차

Abstract The technology of direction finding is very important to make high position fixing accuracy. TDOA(time difference of arrival) direction finding technology is a high accuracy technology and is used in RF system from 1990. The principle of TDOA is to receive an emitter signal with two antennas, measure the time difference of received signal and then convert the time differences to azimuth angle. For high DF(direction finding) accuracy long basis line and high SNR at receiving system are needed. The DF accuracy and position fixing accuracy are simulated with different SNRs and antenna base lines. We obtain the DF accuracy of 0.51° at 0° incident azimuth angle in case of 50m base line and 40dB SNR.

Key Words : Position Fixing, SNR, Direction Finding, TDOA, CEP, Position Error

1. 서론

전파가 송신되는 신호원의 방위와 위치를 측정하는 기술은 재난구조나 군사적으로 매우 많이 사용되고 있으며 방위측정 정확도와 위치측정 정확도를 향상시키기 위해서 여러 종류의 방위탐지 기술이 연구되어 왔다 [1, 2].

방위탐지 기술은 신호원의 송신기에서 송신되어서 방

위탐지 수신기에서 수신되는 전파의 진폭, 위상, 시간, 주파수 등을 이용하여 전파가 송신되는 방위를 찾는 기술이다. 1970년대와 1980년대에는 송신기의 송신신호크기를 두 개의 수신 안테나에서 비교하는 진폭비교 방식과 두 신호의 위상차를 비교하여 송신기의 방위를 찾는 위상비교 방위탐지 기술이 많이 사용되었다.

1990년 이후에는 시간측정정확도가 향상되어 고주파

Received 27 September 2014, Revised 27 October 2014
Accepted 20 November 2014
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.

ISSN: 1738-1916

신호원의 방위탐지에 송신신호의 도착시간차(TDOA: Time Difference of Arrival)를 이용하는 방법과 도착주파수차(FDOA: Frequency Difference of Arrival)를 이용하는 방법이 많이 사용되고 있다[3].

TDOA 기술은 신호원에서에서 송신되는 전파가 서로 다른 위치에 있는 두 개의 방위탐지 수신기에 도달하는 전파의 도착시간차를 이용하여 신호원의 방위를 탐지하는 기술이며 관련 연구들이 최근까지 활발하게 진행되고 있다[4-7]. 1980년대부터 잠수함 탐지를 위해서 수중에서 초음파 센서를 사용하는 소나(sonar) 배열시스템에 사용되었다[8]. 최근에는 시간측정 분해능이 nano 초까지 향상되어서 짧은 안테나 기준선에도 높은 방위탐지 정확도가 가능해져서 미국, 독일, 체코 등에서 장비를 개발하여 사용 중이거나 개발 중에 있다[8].

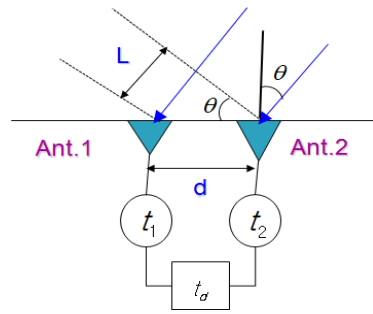
본 논문에서는 TDOA 기술을 이용하여 송신 신호의 방위각과 방위각 정확도를 구하고, 이것을 이용하여 송신기의 위치를 탐지할 때 송신기위치탐지 오차를 계산하였다. 송신기 위치추정은 방위각 탐지정확도에 의한 타원형 기법과 원형오차확률(CEP: Circular Error Probability) 기법을 사용하였다.

2. TDOA 방위탐지

TDOA 기술을 사용하는 방위탐지 방식은 위상비교 기술을 사용하는 방위탐지 방식과 유사하지만, 위상비교 방위탐지 방식은 두 개의 배열안테나에 도착하는 신호의 위상차를 측정하는 것에 비해서 TDOA 방식은 두개의 배열안테나에 도착하는 신호의 시간차를 측정하여 방위각을 계산하는 것이다.

[Fig. 1]은 두 개의 방위탐지용 배열 안테나와 시간차 측정 장치로 구성된 TDOA 방위탐지 장비이다. 여기에서 안테나 1과 안테나 2의 거리를 기준선(d)이라고하고, 송신 신호의 입사각을 θ (rad), 전파속도를 c라 두면, 두 안테나에 도달하는 송신신호의 도착 시간차(t_d)는 식 (1)과 같이 표시할 수 있다[2].

$$t_d = \left(\frac{1}{c}\right) d \sin \theta \quad (1)$$



[Fig. 1] Principle of TDOA Direction Finding

송신신호의 입사방위각 θ 에 대한 측정방위각 오차를 구하기 위해서 식 (1)을 미분하여 측정방위각에 대한 방위각 오차 $\Delta\theta$ 에 대해서 정리하면 식 (3)과 같이 된다. 여기에서 $\Delta(t_d)$ 는 측정시간 오차, Δd 는 기준선 거리오차이다.

$$\frac{\partial}{\partial t} t_d = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{c}\right) d \sin \theta \quad (2)$$

$$\Delta(t_d) = \left(\frac{d \cos \theta}{c}\right) \Delta\theta + \frac{\sin \theta}{c} \Delta d \quad (3)$$

식 (3)에서 기준선 거리오차 Δd 를 0으로 가정하면 방위각 오차는 식 (4)와 같이 시간측정오차 $\Delta(t_d)$ 에 의해 결정되며 이 때 각도 단위는 라디안(radian)이다.

$$\Delta\theta = \left(\frac{c}{d \cos \theta}\right) \Delta(t_d) \quad (4)$$

3. 방위탐지 정확도 모사

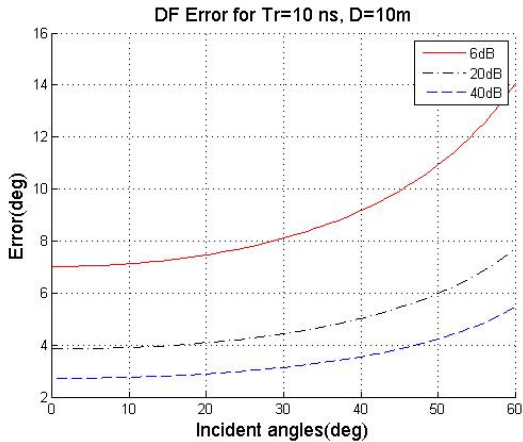
식 (4)에서 방위각 오차는 기준선의 길이와 송신신호 입사각의 코사인값($\cos \theta$)에 반비례하고, 시간측정 오차에 비례한다. 시간측정 오차는 [9]에서 방위탐지수신기의 SNR과 펄스신호의 상승시간(Tr)의 함수이며 식 (5)와 같이 유도된다.

$$\Delta(t_d) = \frac{T_r}{\sqrt{SNR}} \quad (5)$$

방위각 오차를 방탐수신기의 SNR과 펄스신호의 상승 시간(T_r)에 대해서 구하기 위해 식 (4)에 식 (5)를 대입하면 방위각 오차는 식 (6)과 같이 된다.

$$\Delta\theta = \left(\frac{c T_r}{d \cos\theta \sqrt{SNR}} \right) \quad (6)$$

[Fig. 2]는 안테나 거리를 10m, 펄스신호의 상승시간(T_r)을 10ns, SNR을 6dB, 20dB, 40dB로 한 경우 신호의 입사각 범위가 $0^\circ \sim 60^\circ$ 인 경우에 대한 모사 결과이다. 방위각 오차는 SNR이 40dB인 경우 입사각이 0° 일 때 약 2.6° 에서 입사각이 60° 이면 5.5° 가 되는 것을 볼 수 있다.

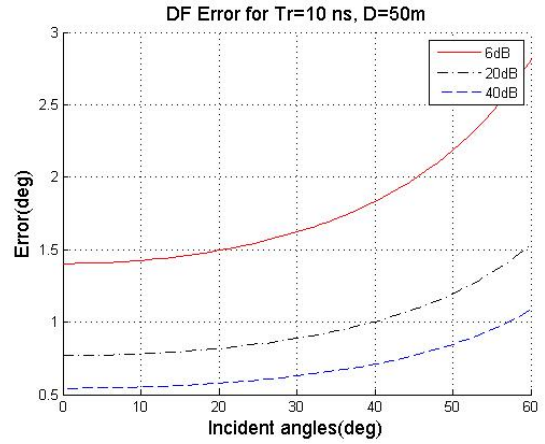


[Fig. 2] Azimuth Angle Errors vs. Incident Angles ($T_r=10$ ns, $d=10$ m)

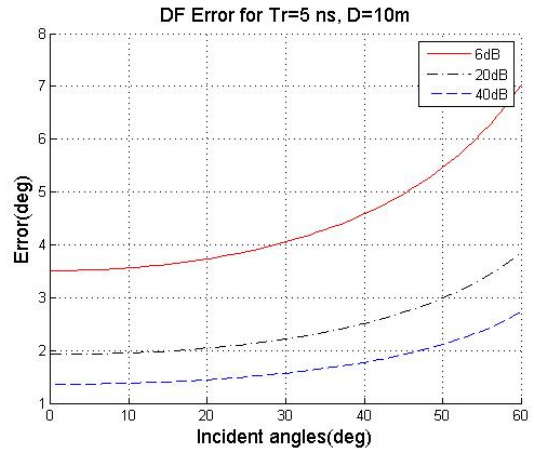
[Fig. 3]은 안테나 거리를 50m, 펄스신호의 상승시간(T_r)을 10ns, SNR을 6dB, 20dB, 40dB로 한 경우에 대한 모사 결과이다. 방위각 오차는 SNR이 40인 경우 입사각이 0° 일 때 약 0.51° 에서 입사각이 60° 이면 1.1° 가 되는 것을 볼 수 있다.

[Fig. 4]는 안테나 거리를 10m, 펄스신호의 상승시간(T_r)을 5ns, SNR을 6dB, 20dB, 40dB로 한 경우에 대한 모사 결과이다. 방위각 오차는 SNR이 40dB인 경우 입사

각이 0° 일 때 약 1.3° 에서 입사각이 60° 이면 2.7° 가 되는 것을 볼 수 있다.

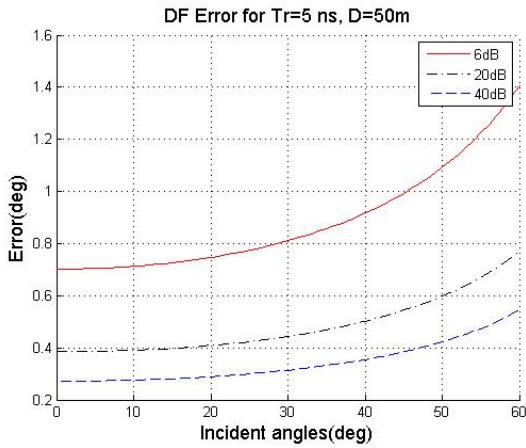


[Fig. 3] Azimuth Angle Errors vs. Incident Angles ($T_r=10$ ns, $d=50$ m)



[Fig. 4] Azimuth Angle Errors vs. Incident Angles ($T_r=5$ ns, $d=10$ m)

[Fig. 5]는 안테나 거리를 50m, 펄스신호의 상승시간(T_r)을 5ns, SNR을 6dB, 20dB, 40dB로 한 경우에 대한 모사 결과이다. 방위각 오차는 SNR이 40dB인 경우 입사각이 0° 일 때 약 0.26° 에서 입사각이 60° 이면 0.55° 가 되는 것을 볼 수 있다.



[Fig. 5] Azimuth Angle Errors vs. Incident Angles (Tr=5ns, d=50m)

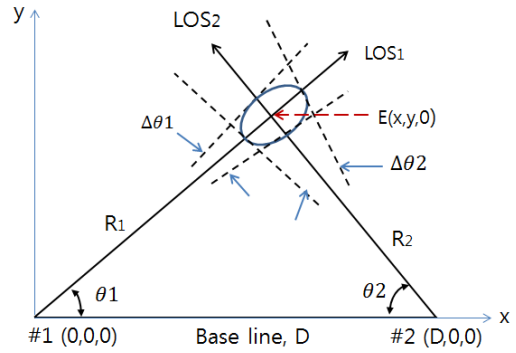
4. 위치표정 오차 분석

4.1 방위각 기준 위치오차분석

송신신호의 위치를 결정하는 위치표정(position fixing) 방법에는 다수의 방탐수신기에서 측정된 송신신호의 방위각을 연장하여 교차점을 찾는 방탐기준(Direction Finding based) 방식과 3 개 이상의 수신점에서 타원형계적 교차점을 이용하여 위치를 찾는 거리기반(Range-based) 위치표정 방법이 많이 사용된다[3, 9].

방위각 기준 방식의 위치 표정오차는 [Fig. 6]과 같이 #1 안테나와 #2 안테나에서 측정된 송신기의 방위각을 연장하여 두 방위각의 교차점에 형성되는 오차범위를 타원형 모델로 처리하는 방법이다. [Fig. 6]에서 #1 지점(0, 0)과 #2 지점(b, 0)에 있는 방탐수신기가 E(x, y)지점에 위치한 표적의 방위각을 측정한다. 측정 방위각이 오차가 0°이면 두 방위각의 교차점은 정확하게 E 지점에서 만나지만 방위각 오차에 의해서 표적의 위치는 E 주변 사각형 내부의 한 점이된다. 오차사각형을 확률 값에 따른 오차타원으로 치환하여 오차타원의 장축과 단축을 구하면 다음과 같이 구할 수 있다[10].

[Fig. 6]의 지점 1, 지점 2에서 E(x, y)의 y 값을 계산하면 식 (7)과 같고, E(x, y)가 두 방위각 연장선의 교차점 위에 있으면 E의 x 좌표, y 좌표는 식 (8), (9)와 같이 유도된다.



[Fig. 6] DF-based Position Fixing

$$y = x \tan \theta_1 = (D - x) \tan \theta_2 \quad (7)$$

$$x = \frac{D \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (8)$$

$$y = \frac{D \sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (9)$$

식 (8), (9)에서 방위각(θ_1, θ_2) 변화(variation)에 의한 E의 좌표(x, y)의 변화(variation)를 구하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \partial x \\ \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial \theta_1 \\ \partial \theta_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,

$$a = \frac{-D \sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{D \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (11)$$

$$b = \frac{D \cos \theta_1 \cos \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{D \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (12)$$

$$c = \frac{D \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{D \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (13)$$

$$d = \frac{D \sin \theta_1 \cos \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{D \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (14)$$

식 (10)의 변화(variation)에 대한 공분산(covariance)은 식 (15)와 같이 표시될 수 있다[10].

$$cov \begin{bmatrix} \partial x \\ \partial y \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \partial x \\ \partial y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial x, \partial y \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$= \begin{bmatrix} ab \\ cd \end{bmatrix} E \left\{ \begin{bmatrix} \partial \theta_1 \\ \partial \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial \theta_1, \partial \theta_2 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} ab \\ cd \end{bmatrix}^T$$

방위각 θ_1, θ_2 에 대한 표준편차(standard deviation)를 $\sigma_{\theta_1}, \sigma_{\theta_2}$ 라 하면 식 (15)의 공분산 행렬은 식 (16)과 같이 표현된다.

$$cov \begin{bmatrix} \partial x \\ \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2\sigma_{\theta_1}^2 + b^2\sigma_{\theta_2}^2 & ac\sigma_{\theta_1}^2 + bd\sigma_{\theta_2}^2 \\ ac\sigma_{\theta_1}^2 + bd\sigma_{\theta_2}^2 & c^2\sigma_{\theta_1}^2 + d^2\sigma_{\theta_2}^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

또한 [Fig. 6]에서 방위각 오차 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2$ 는 표준편차 $\sigma_{\theta_1}, \sigma_{\theta_2}$ 으로 치환될 수 있으며 두 표준편차의 평균치는 σ_θ 로 표시할 수 있다. 식 (16)의 공분산행렬에서 고유치(eigenvalue)를 구하면 고유치의 두 값은 [Fig. 7]과 같은 오차타원의 장축(σ_{max})과 단축(σ_{min})이 되며 다음과 같이 구할 수 있다[3].

$$\sigma_{max} = (D\sigma_\theta / \sin(\theta_1 + \theta_2))((A + \sqrt{C})/2)^{1/2} \quad (17)$$

$$\sigma_{min} = (D\sigma_\theta / \sin(\theta_1 + \theta_2))((A - \sqrt{C})/2)^{1/2} \quad (18)$$

여기서

$$A = \sin^2\theta_1 + \sin^2\theta_2$$

$$C = A^2 + 4A\sin^2\theta_1\sin^2\theta_2 - 8\sin^3\theta_1\sin^3\theta_2\cos(\theta_2 - \theta_1)$$

4.2 원형오차확률(CEP) 모델

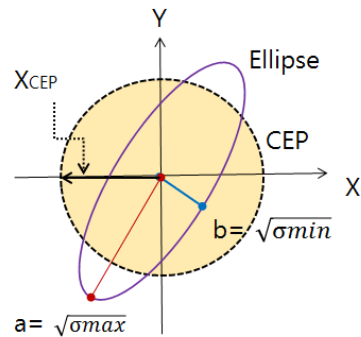
원형오차확률(CEP) 방법은 간단한 위치예측 정확도 측정방법으로 많이 사용되고 있다. CEP는 2차원 시스템에서, 평균치가 그 중심이 되는 랜덤 벡터 값의 50%를 포함하는 원의 반지름으로 정의된다.

[Fig. 7]은 [Fig. 6]의 오차타원과 CEP의 기하학적 관계를 도시하고 있다. 오차타원의 장축(σ_{max})과 단축(σ_{min}) 값이 주어지면 오차타원의 중심에서 표적의 50%

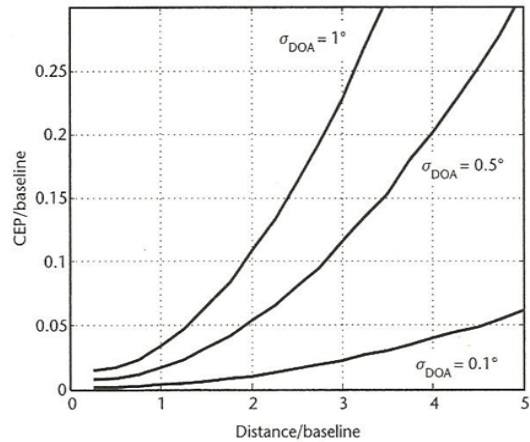
를 포함하는 CEP의 반지름(X_{cep})은 식 (19)와 같이 근사화 될 수 있다[9].

$$X_{cep} = 0.75 \sqrt{\sigma_{max} + \sigma_{min}} \quad (19)$$

[Fig. 8]은 [Fig. 6]에서 #1, #2 에서 방위각 오차가 1°, 0.5°, 0.1°인 경우 기준선(D)과 표적의 거리에 따른 CEP의 반지름(X_{cep}) 크기를 모의 한 것으로 표적의 위치오차를 잘 예측할 수 있다.



[Fig. 7] CEP Position Fixing



[Fig. 8] Normalized CEP of the triangulation technique vs. distance along the baseline axis[3]

5. 결론

본 논문에서는 TDOA 방위탐지 기법의 정확도 분석과 이를 이용한 위치표정 정확도에 대해서 기술하였다. TDOA 방위탐지 오차는 프로세서의 시간 분해능과 수신 신호의 SNR에 크게 관계되므로 SNR의 변화에 따른 모사를 실시하였다. 펄스의 상승시간이 10ns이고, 기준선의 길이가 50m인 경우에 SNR이 40dB 이상이면, 입사방위 각 0°에서 약 0.51°의 방위탐지 정확도를 얻을 수 있었다.

또한 삼각측정법(triangulation)에 의한 위치표정 오차를 수식적으로 유도하여 위치오차범위에 대한 수치적 모사를 제안하였다. 특히 방위각 측정오차가 1°, 0.5°, 0.1°인 경우 기준선(D)과 표적의 거리에 따른 CEP의 반지름(X_{cep}) 크기를 모의하였다. 이러한 결과는 조난구조 및 군사적 위치추정에 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

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] Andrea De Martino, *Introduction to Modern EW Systems*, Artech House, Boston, 2012.
 [4] N. El Gemayel, H. Jakel, F. K. Jondral, "Error analysis of a low cost TDoA sensor network," *IEEE Position, Location and Navigation Symposium* 2014, pp. 1040-1045, 2014.
 [5] J. Falk, P. Handel, M. Jansson, "Effects of frequency and phase errors in electronic warfare TDOA direction-finding systems," *IEEE Military Communications Conference MILCOM '03*. pp. 118-123 Vol. 1, 2003.
 [6] M. Aatique, "Evaluation of TDOA Technique for Position Location in CDMA System," *Master's Thesis at Virginia Polytechnic Institute and State University*, September 1997.
 [7] R. Kaune, J. Horst, and W. Koch, "Accuracy analysis for TDOA localization in sensor networks," in *Proc. IEEE FUSION*, pp. 1647-1654, July 2011.

[8] Carter G. C. "TDOA delay estimation for passive sonar signal processing," *IEEE Trans. on Acoustics, speech, signal processing*, vol. 29, no 3, pp. 463-470, June 1981.
 [9] Richard G. Wiley, *ELINT, The interception and analysis of radar signals(2nd edition)*, Artech House, 2010.
 [10] Richard G. Wiley, *Electronic Intelligence, The interception and analysis of radar signals*, Artech House, 1985.

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

채 규 수(Chae, Gyoo-Soo)



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 12월 : Virginia Tech. 전기공학과(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