

TDOA 기법을 활용한 ELINT 장비의 방위탐지 정확도 분석

임중수^{1*}, 채규수¹, 김민년¹
¹백석대학교 정보통신학부/RDRC

An Analysis of Direction Finding Accuracy of ELINT System

Joong Soo Lim^{1*}, Gyoo-Soo Chae¹ and Min-Nyun Kim¹

¹Division of Information Communication Eng., Baekseok University/RDRC

요 약 정보수집용 ELINT 장비에서 전파의 방위를 정확하게 찾는 기술은 매우 중요하다. 신호도착 시간차(TDOA)를 이용하는 방위탐지 장치는 수신용 배열 안테나와 시간차 측정장치로 구성된다. TDOA 기술은 에미터 신호가 수신용 배열 안테나 시스템의 각각의 안테나에 도달하는 시간차를 계산하여 에미터의 방위를 산출하는 방법이다. TDOA 방식은 광대역 주파수에서 사용 가능하며 위상변별기나 주파수 측정기와 같은 복잡한 장치가 필요하지 않기 때문에 구성이 간단하다. 그러나 방위 탐지정확도를 높이기 위해서는 시간 측정 분해능이 좋아야하고 수신 안테나 배열간격이 길어야 한다. 본 논문에서는 실제 환경과 유사한 잡음을 고려한 환경에서 방위탐지 정확도를 모사하고 그 결과를 분석하였다.

Abstract The technology of direction finding is very important to find the direction of emitters for ELINT(electronic intelligence) system. The principle of TDOA(time difference of arrival) is to receive an emitter signal with two antennas, measure the time difference between two antennas, and converse the time difference to direction difference. This technology can be used in broadband frequency system and make the system very simple because a phase-discriminator and a voltage comparator are not needed. For fine DF accuracy, high time resolution receiver and long basis line antennas are needed. The DF accuracy of noise added signals is simulated with different time

Key Words : Direction finding, TDOA, Emitter, Time Resolution, Receiver, Antennal

1. 서론

방위탐지(direction finding: DF)기술은 전자정보(electronic intelligence: ELINT) 장비나 전자전(Electronic Warfare: EW) 장비 설계에 매우 중요하다. 이러한 장비의 방위탐지 방식은 레이더가 사용하는 능동식(active) 방위탐지와 다른 수동식(passive) 방위탐지 방식이다. 수동식 방위탐지 방식은 자신이 전파를 방사한 뒤에 반사신호를 수신하는 방식이 아니고, 상대방이 방사하는 전자파 신호를 수신만하여 상대방의 방위를 찾는 방식을 말한다 [1].

전자전 또는 ELINT 장비에 사용되는 방위탐지 기술은 20세기 초에 시작되어 2차 세계대전 이후 계속 발전

하여 왔으며, 1980년대 이후 마이크로프로세서 기술과 초고주파 소자분야의 기술 발전으로 초고주파 주파수대역의 방위탐지 기술이 매우 발달되었다. 초고주파 주파수대역의 방위탐지 기술은 여러 가지가 있으나 현재까지 실용화되고 있는 주요 기술은 (1) 안테나를 회전 하는 회전 방위탐지 기술 (2) 배열 안테나구조에서 두 안테나의 입력신호의 진폭을 비교하는 진폭비교 방위탐지 기술 (3) 배열 안테나구조에서 두 안테나의 입력신호의 위상크기를 비교하는 위상비교 방위탐지 기술 (4) 로트만 렌즈와 같은 전파 렌즈를 사용하는 방위탐지 기술 (5) 신호도착 시간차(Time Difference of Arrival: TDOA)를 이용하는 TDOA 방위탐지 기술 (6) 주파수 지연을 이용하는 FDOA(frequency delay of arrival) 방위탐지 기술 등이 있

*교신저자 : 임중수(jslim@bu.ac.kr)

접수일 09년 08월 13일

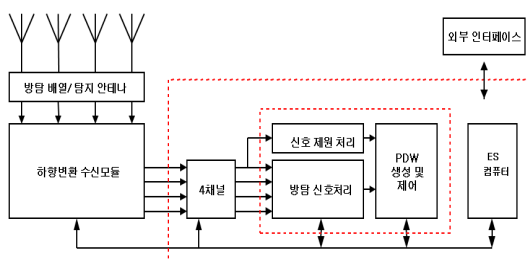
수정일 (1차 09년 10월 08일, 2차 09년 11월 10일)

게재확정일 09년 11월 12일

대[2].

TDOA 기술은 상대방의 에미터(또는 목표물)에서 방사된 전파가 전자전 장비의 여러 개의 방위탐지 수신안테나에 도달하는 신호의 도착 시간차를 이용하여 에미터(신호원)의 방위를 탐지하는 방식으로써, 1980년대부터 잠수함 탐지를 위해서 수중에서 초음파 센서를 사용하는 소나(sonar) 배열시스템에 사용되었다. 수중에서 음파의 속도는 약 1.1×10^3 m/sec 로 전파의 속도보다 상대적으로 매우 느리기 때문에 도착시간차를 측정하기가 쉽고 시간 측정 분해능이 낮아도 실용화가 가능하였다. 초음파 센서를 사용하는 TDOA 방위탐지 기술은 수중이나 표적의 이동 속도가 느린 경우에 많이 활용되었으나, 최근에 와서 방위탐지 프로세서의 시간 측정 정확도가 향상되면서 초고주파를 사용하는 전자전 장비에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다[3].

일반적인 전자전 장비는 그림 1과 같이 안테나부, 수신부 등으로 구성되어 있으며, 방위탐지 안테나는 수신모듈 전단에 설치되어 있다. 항공기나 차량, 함정 등에 방탐 배열 안테나를 설치하여 표적의 방위를 탐지하는 TDOA 기술은 배열안테나 간격(또는 기준선)이 길어야 방위탐지 정확도가 높아진다. 항공기나 차량은 물리적으로 크기가 제한되어 있어 배열안테나 간격을 길게 할 수 없어서 2000년대 이전에는 많이 개발되지 않았으나, 최근에 와서 시간차 측정 분해능이 나노 초까지 가능해서 짧은 안테나 기준선에도 높은 방위탐지 정확도가 가능해져서 미국, 독일의 ACAM사, 스웨덴, 체코 등에서 장비를 개발하여 사용 중이거나 개발 중에 있다[4,5].

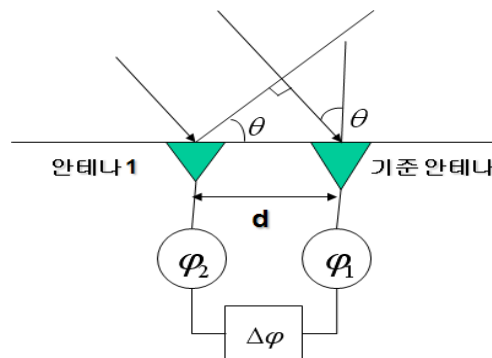


[그림 1] TDOA 기법의 전자전 시스템 구성도

2. 위상비교 방위탐지 원리

위상비교 방위탐지 방법은 TDOA 방식과 유사한 구조를 가지고 있다. 이 방식은 일명 인터페로미터(interferometer) 방식으로도 명명되고 있으며, 음성 신호로부터 빛에 이르는 넓은 주파수 영역에서 에미터의 방

위를 결정할 때 사용되는 보편적인 기술이다. 이 방식은 그림 2와 같이 잘 정합된 두 개의 안테나와 위상변위기(phase discriminator)를 사용한다. 에미터 신호는 두 개의 안테나에 수신되어 위상 비교기로 전달되고, 여기서 두 신호의 안테나에 도달한 위상차를 측정된 뒤에 식 (1)을 이용하여 에미터 신호의 도래 방위를 측정한다[2]. 이 방식은 구성은 간단하나 위상차를 비교하는 위상변위기 제작이 어렵고 가격이 비싼 단점이 있다.

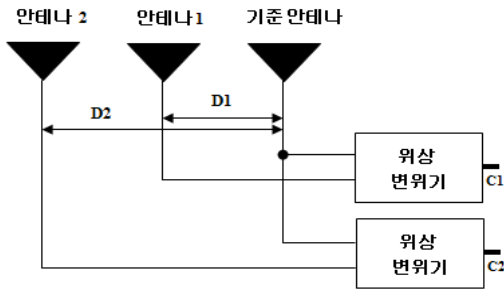


[그림 2] 위상비교 방위탐지 원리

그림 2에서 두 안테나의 전기적 중심을 잇는 선이 기준선(baseline)이며 거리는 d 이다. 기준선의 법선과 θ 각을 이루며 에미터 신호가 도래하면, 안테나 1에 도달하는 신호 경로는 기준 안테나에 도달하는 신호경로보다 짧고, 두 안테나에서 측정되는 위상차 ϕ 는 식 (1)과 같이 되어 위상차 측정으로부터 에미터 신호의 도래방위를 구할 수 있다. 여기서 λ 는 입사신호의 파장이다.

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

식 (1)에서 d 가 커지면 위상차(ϕ)의 측정 오차값이 줄어들게 되므로 방탐 정확도를 높이기 위해서는 기준선을 길게 해야 한다. 그러나 기준선을 길게하여 기준선의 길이가 입사 에미터 신호의 반 파장을 초과하면 측정방향에 여러 개로 계산되는 모호성이 발생하게 된다. 모호성을 해결하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 모호성 방위를 해결하고 방탐 정확도를 높이는 방법 중의 하나는 그림 3과 같이 길이가 다른 여러 개의 기준선을 사용하여 길이가 가장 긴 기준선을 이용하여 정확도를 높이고 나머지 기준선을 이용하여 모호성을 제거하는 다중 기준선 위상비교 방탐장치가 많이 사용된다.

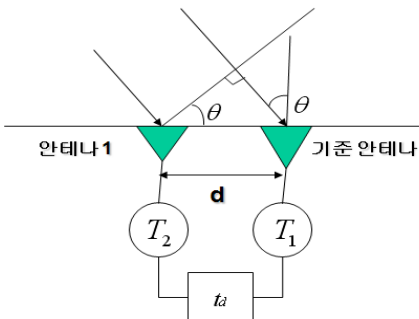


[그림 3] 다중기준선 위상비교 방탐장치

3. TDOA 방위 탐지 원리

2000년대 이후 펄스신호 측정 분해능이 매우 좋아지면서 초고주파 대역에서도 신호도착 시간차를 이용한 신호원의 방위탐지 기술이 발달하였다. 그림 4는 2 개의 안테나와 1 개의 시간차측정기를 갖는 TDOA 방위탐지 장치의 가장 간단한 구성도이다. TDOA 방위탐지 구성은 위상비교 방위탐지 구성과 유사하지만, 위상비교 방탐장비가 두개의 안테나에 도착하는 신호의 위상차를 측정하는 것에 비해서 TDOA 방위탐지는 두개의 안테나에 도착하는 신호의 시간차를 측정하여 신호 도래 방위를 계산하는 것이다. 그림 4에서 안테나 1과 2간의 거리를 d 라 하고, 에미터 신호의 입사각을 θ (rad.), 전파의 속도를 c 라 두면, 두 안테나에 도달하는 에미터 신호의 시간차(t_d)는 식 (2)와 같다[2].

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



[그림 4] TDOA 방탐 원리

식 (2)에서 이격거리 d 는 m, 시간은 나노 초(nano second), 입사각은 라디안(radian)을 적용하면 식 (2)는 식 (3)과 같이 전개되고, 식 (3)에서 에미터의 방위각을 구하

면 식 (4)와 같이 된다.

$$t_d = 3.33 d \sin\theta_{AZ} \quad (3)$$

$$\theta_{AZ} = \sin^{-1} \left[\frac{(t_d)}{3.33 d} \right] \text{ (rad.)} \quad (4)$$

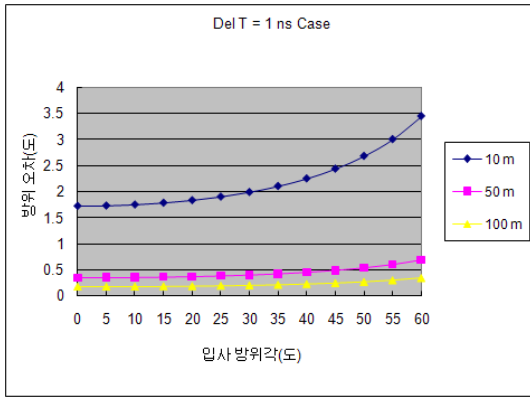
식 (4)는 에미터의 양각(또는 고각)이 0 도이거나 매우 낮은 경우에 적용할 수 있다. 그러나 에미터의 양각이 높으면 양각에 의한 방위각 측정오차(코니시티 오차)가 발생하고, 양각에 대한 방위정보가 필요한 경우도 있으므로 양각도 동시에 측정해야 할 경우가 있다.

4. 방위탐지 정확도 모사

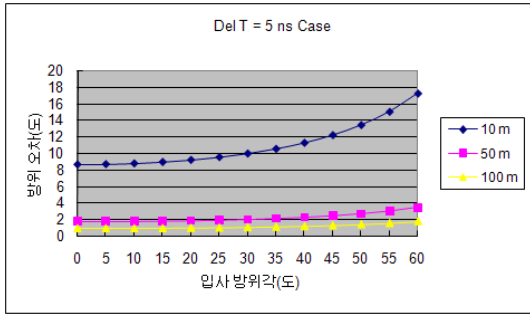
방위탐지 정확도를 향상시키기 위해서는 베이스라인 길이, 시간 측정 분해능, 오차 원인을 분석해서 최적화하는 것이 좋다. 일반적으로, 첫 번째 설계 단계는 방탐장비를 설치할 플랫폼과 배치상황을 만족하는 최대 기준선을 선정하는 것이고, 다음으로 방위탐지 오차는 오차 원인이 없는 실험실인 경우와 오차 원인이 존재하는 실제상황에서 시간차측정 최고 해상도를 기준으로 계산한다. 방위각 측정 오차 (θ_e)는 신호원에서 수신 안테나까지의 거리가 두 안테나 사이의 거리(d)보다 매우 크고, 두 안테나 사이의 거리가 정확하다는 조건에서 식 (2)로부터 다음과 같이 유도된다. 여기서, t_{de} 는 시간 측정 RMS 오차 (nano sec.)이고, d 는 기준선 거리(m)이고 θ_e 는 도($^\circ$)이다 [2,5].

$$\theta_e = \left[\frac{(17.2t_{de})}{(d \cos\theta)} \right] \quad (5)$$

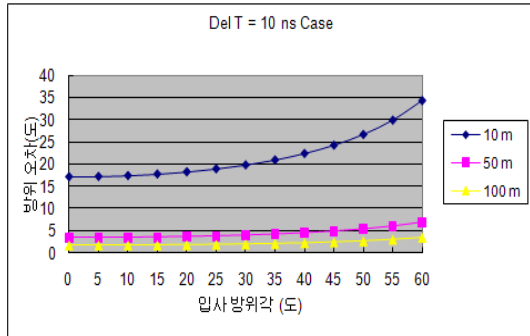
고각을 0 도로 가정하면, 시간 측정 RMS 오차 t_{de} 가 1ns, 5ns, 10ns인 경우, 베이스라인의 길이가 10 m, 50 m, 100 m 일 때 입사 방위각에 대한 방위 오차는 그림 5, 그림 6, 그림 7과 같다. 그림에서 두 안테나의 기준선이 10 m, 100 m이고 시간차 측정오차가 1.0 ns이면, 입사 방위각 0도 에서 약 1.75 도와 0.2 도의 방위탐지 정확도를 얻을 수 있다.



[그림 5] 입사 방위각별 방위오차(tde=1 ns)



[그림 6] 입사 방위각별 방위오차(tde=5 ns)



[그림 7] 입사 방위각별 방위오차(tde=10 ns)

5. 신호왜곡을 고려한 방위 탐지 모사

아나로그 신호가 입력되면 시간측정 순간이 매우 중요하다. 불완전한 시간 측정엔 시간차 측정 정확도를 저하시킨다. 주요 저하 요인은 SNR(signal to noise ratio)를 낮추는 열잡음, 펄스신호의 상승단과 하강단시간을 줄이는 신호 왜곡(signal dispersion)이 있다. 신호 펄스 분산(dispersion)은 신호의 다중경로와 같은 외부 신호원, 비

선형 비디오 검출과 최적화되지 않은 수신기 대역폭과 같은 내부 신호원인에 의해 발생될 수 있다. 펄스의 선단에서 시간차 측정에 대한 RMS 오차(t_{deL})는 Cramer-Rao Bound 에 의해서 다음과 같이 주어진다[4,6,7].

$$t_{deL} = \frac{(t_r)}{\sqrt{2 SNR}} \tag{6}$$

여기서 t_r 은 비디오 펄스 상승시간이고 SNR(signal to noise ratio)은 비디오 SNR이다. 선형 비디오 검출과 큰 SNR이 가정되었다. 마이크로웨이브 이하 주파수에서, t_r 은 다중경로, 송신 경로 펄스 분산과 입사 RF신호의 지엽복사와 산란과 같은 외부 신호원인에 의해 성능이 저하된다. 그러나 어떤 경우에는 t_r 이 방탐 수신기 비디오 대역폭 B_v 에 의해 저하될 수 있다. 일반적으로 비디오 대역폭에 대한 신호의 상승시간은 다음과 같이 주어진다.

$$t_r = \frac{0.35}{B_v} \tag{7}$$

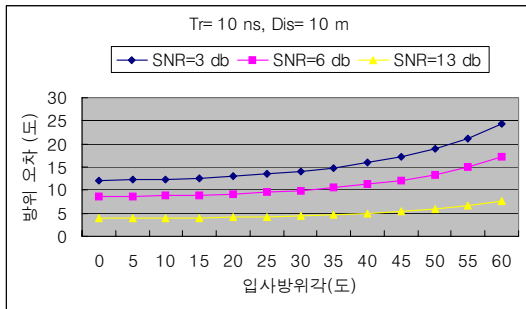
2 개의 독립적인 기준선에서 시간차를 측정할 경우 최종 전체 RMS오차 t_{de} 는 $\sqrt{2}$ 만큼 향상되므로, 식 (6)은 식 (8) 또는 (9)와 같이 된다. 또한 펄스 RF 신호가 레이더의 경우처럼 반복적이라면 다중 시간차 측정이 수행될 수 있고 평균화가 가능하다. N 번의 시간차 측정과 평균화가 가능하다면, t_{de} 는 \sqrt{N} 만큼 줄어든다.

$$t_{de} = \frac{t_r}{\sqrt{SNR}} \tag{8}$$

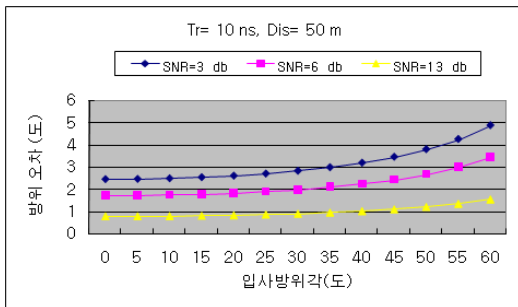
$$t_{de} = \frac{(0.35)}{[(B_v)(\sqrt{SNR})]} \tag{9}$$

고각을 0° 로 가정하면, 펄스신호의 상승시간 t_r 가 10ns 이고, 베이스라인의 길이가 10m, 50m, 100m 인 경우, SNR이 3 dB, 6 dB, 13 dB 일 때 입사 방위각에 대한 방위 오차는 그림 8, 그림 9, 그림 10과 같다. 그림에서 펄스의 상승시간이 10 ns 이고, 베이스 라인의 길이가 10 m인 경우에 SNR이 13 dB 이상이면, 입사방위각 0 도에서 약 3.9 도의 방위탐지 정확도를 얻을 수 있고, 같은

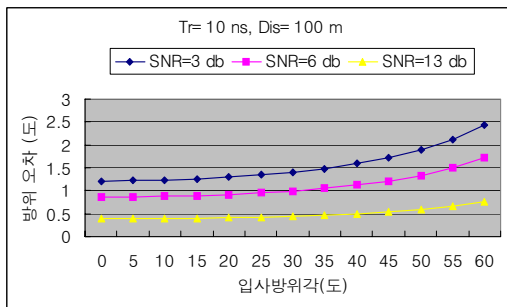
조건에서 안테나 간격이 100 m인 경우에는 0.4 도의 방위탐지 정확도를 얻을 수 있다.



[그림 8] 방위각별 오차(tr=10 ns, D=10 m)



[그림 9] 방위각별 오차(tr=10 ns, D=50 m)



[그림 10] 방위각별 오차(tr=10 ns, D=100 m)

6. 결론

TDOA 방탐기술은 광대역 주파수 신호의 방위를 탐지할 수 있고, 위상변별기나 주파수 측정기와 같은 장치가 부가적으로 필요하지 않기 때문에 비교적 간단한 시스템 구성이 가능하다. 그러나 방탐 정확도를 높이기 위해서는 nano second 이하의 시간차를 정확하게 측정해야하기 때문에 고 분해 클럭(clock)과 수신 펄스에 대한 수신 임계

치 결정 기술이 필요하다.

본 논문에서는 고각이 0 도인 경우 입사 방위각에 따른 방위오차를 모사한 결과 두 안테나의 기준선이 10 m, 100 m이고 시간차 측정오차가 1.0 ns이면 입사방위각 0 도에서 약 1.75 도와 0.2 도의 방위탐지 정확도를 얻을 수 있다. 또한 대부분의 시간차 측정오차는 프로세서의 시간 분해능, 레이더 펄스의 상승시간, 수신 신호의 SNR에 관계되므로 SNR의 변화에 따른 모사를 실시하였다. 펄스의 상승시간이 10 ns이고, 베이스 라인의 길이가 10 m인 경우에 SNR이 13 dB 이상이면, 입사방위각 0도에서 약 3.9 도의 방위탐지 정확도를 얻을 수 있었고, 같은 조건에서 안테나 간격이 약 100 m인 경우에는 0.4 도의 방위탐지 정확도를 얻을 수 있었다.

전투기의 날개사이의 길이를 10-20 m, 함정의 선수에서 선미 사이의 길이는 20-100m 정도이다. 최근에 개발된 시간 정밀 측정 소자를 조사한 결과 ACAM 사의 TDC(time to digital converter)는 시간차 측정 분해능이 250 피코 초(pico second)이하였다. 따라서 함정이나 항공기에 탑재하는 방탐 장비에도 TDOA 방식을 단독으로 적용할 수 있다고 판단된다. 또한 TDOA 방식을 2장에서 소개한 위상비교 방탐 방식과 복합해서 사용하면 두개의 안테나로 모호성이 없고 방탐정확도가 높은 방위탐지를 할 수 있다고 판단된다.

그러나 TODA 방식을 적용할 경우에는 수신채널의 채널 불균형, 커플링, 채널 간 진폭 불균형은 시간차 측정오차를 유발하며 이것은 방위탐지 오차를 가져오므로 이러한 부분에 대한 연구를 계속해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [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] 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.
- [4] Graham James, "The Application of Time to Digital Converters to ESM Systems" *1st EMRS DTC Technical Conference*, Edinburgh(ESL Defence Ltd, South-hampton), 2004.
- [5] Kumar Gaurav Chhokra, Ted Bapty, Jason Scott, Mitch Wilkes, "Accuracy Enhancements for TDOA Estimation on Highly Resource Constrained Mobile Platforms,"

Technical Report, ISIS-03-402, Vanderbilt University, Oct. 2003.

- [6] Richard G. Wiley, *Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals (Second Edition)*, Artech House, Boston, 1993.
- [7] Aysegul Dersan, Yalcin Tanik, "Passive Radar Location By Time Difference of Arrival", *IEEE Trans. on Ant. and Propagation*, PP. 1251-1257, March 2002.

임 중 수(Joong-Soo Lim)

[정회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 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

채 규 수(Gyoo-Soo Chae)

[종신회원]



- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 12월 : Virginia Tech (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2003년 2월 : Amphenol Mobile (RF manager)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>

안테나 설계, 초고주파 이론

김 민 년(Min-Nyun Kim)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 홍익대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 대우전자 전략기술연구소
- 2003년 6월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 2002년 3월 : 백석대학교 정보통신학부 전임강사

<관심분야>

초고주파, 레이더, 전파산란, 광파