

해상 환경에 따른 전자빔 보상방법 연구

A Study of Motion Compensation for Electronic Beam on Sea Environments

윤주호 · 백지웅 · 박종일 · 윤기철* · 김관성*

Juho Yun · Ji Woong Paik · Jongil Park · Kichul Yoon · Kwan Sung Kim*

요 약

본 논문에서는 해상 환경에 따른 빔의 요동을 보상하는 방법에 대하여 제시한다. 함정용 레이다는 해상 환경에 따라서 함 자세의 변화가 발생하기 때문에, 정확한 빔 조향을 위해 요동에 대한 보상이 필요하다. 빔 조향값의 보상만이 요구되는 pitch, yaw 방향의 자세 변화와는 달리, roll 방향의 변화는 빔의 회전이 발생하기 때문에 이에 대한 보상 또한 필요하다. 빔 회전 보상을 위하여 요동값에 따른 빔 회전을 수행하였으며, 2차원 빔 이동을 통하여 최종적으로 전자빔 보상을 수행하였다. 또한, 20×20 배열을 이용한 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 방법을 검증하였다.

Abstract

In this study, motion compensation for electronic beams in sea environments is proposed. Because the radar on a ship fluctuates according to the sea environment, it is necessary to compensate for the fluctuation to achieve accurate beam steering. Unlike the fluctuations in the pitch and yaw directions, where only compensation for the beam steering value is required, the fluctuation in the roll direction causes the beam to rotate. Therefore, compensation for the rotation of the beam in the roll direction is necessary. For this purpose, beam rotation and 2-D beam steering were performed. Finally, the proposed method is applied to a 20×20 array and verified.

Key words: Beam Rotation, Cosecant Squared Beam, Digital Beamforming, Motion Compensation, Sea Environments

I. 서 론

해상 환경에서의 레이다의 운용은 파도와 같은 외부 환경에 의하여 roll, pitch, yaw로 정의되는 함 자세의 변화를 겪으며, 이를 보상하지 않으면 원하는 방향으로 빔이 조향된다. 따라서 함정용 레이다는 원하는 방향으로 빔을 조향하기 위하여 요동에 의한 보상이 필요하며, 기계적/전자적인 방법으로 빔 조향 각도를 보상해주는 방법

들이 연구되었다^{[1],[2]}.

Pitch, yaw 방향으로 발생하는 요동의 경우 빔 조향 각도에 대한 보상만이 요구되는 반면, roll 방향 요동의 경우 빔의 회전이 발생하기 때문에 이에 대한 보상이 필요하다. 펜슬빔만을 운용하는 상황에서는 3 dB 빔폭 내에서의 빔의 형상이 거의 대칭이기 때문에 회전된 빔에 대한 보상이 필요하지 않지만, 코시컨트 제곱 패턴, 플랫폼 패턴 등과 같은 빔을 운용하는 상황에서는 회전된 빔에 대한

「이 논문은 2020년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: UC160030FD)」
한화시스템(Hanwha Systems)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received October 14, 2022 ; Revised November 10, 2022 ; Accepted November 30, 2022. (ID No. 20221014-085)

· Corresponding Author: Juho Yun (e-mail: wng0501@hanwha.com)

보상 또한 요구된다.

본 논문에서는 코시컨트 제곱빔을 사용하는 시스템에서의 roll 방향에 대한 요동 보상을 위하여 superposition 방법을 이용하였다. 이 방법을 통하여 빔의 회전에 대한 보상을 해주었으며, 그 후에 빔 조향각에 대한 보상을 수행하였다. 또한, 제안된 방법을 검증하기 위하여, 20×20 배열에 적용하여 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

II. 기존의 전자빔 보상방법

전자적 빔 조향식 레이더는 각 소자에 급전되는 신호의 위상을 변화시킴으로써 전자적 빔 조향이 가능하다^{[3],[4]}. 따라서, 그림 1에 정의된 시스템에서 요동에 의해 송신빔이 틀어진 정도를 알 수 있다면, 요동을 보상하여 시스템이 원하는 방향으로 빔을 송신할 수 있다. 일반적으로 함정에는 자이로 시스템이 탑재되어, 이를 통하여 요동값을 측정한다. 측정된 요동값을 이용하여 좌표계 변환을 수행하면 요동에 의하여 빔이 틀어진 정도를 알 수 있으며, 2차원 빔 이동을 통한 보상으로 빔을 시스템 좌표계상의 원하는 방향으로 송신할 수 있다. 함정 요동에 따른 좌표계 변환 수식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix} = [T_{roll}][T_{pitch}][T_{yaw}] \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}$$

$$[T_{roll}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{roll}) & -\sin(\theta_{roll}) & 0 \\ \sin(\theta_{roll}) & \cos(\theta_{roll}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[T_{pitch}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\theta_{pitch}) & \cos(\theta_{pitch}) \\ 0 & -\cos(\theta_{pitch}) & \sin(\theta_{pitch}) \end{bmatrix}$$

$$[T_{yaw}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{yaw}) & 0 & -\sin(\theta_{yaw}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_{yaw}) & 0 & \cos(\theta_{yaw}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 x_s, y_s, z_s 는 시스템 좌표계를 의미하며, x_v, y_v, z_v 는 함정 좌표계를 의미한다. 수식에서 볼 수 있듯이 함정 좌표계 값은 함정의 요동에 따라서 변하게 되며, 이로 인하여 송신빔의 방향이 틀어지게 된다. 전자빔 보상은 함정 좌표계 값을 보상하여 시스템 좌표계상에서 원하는

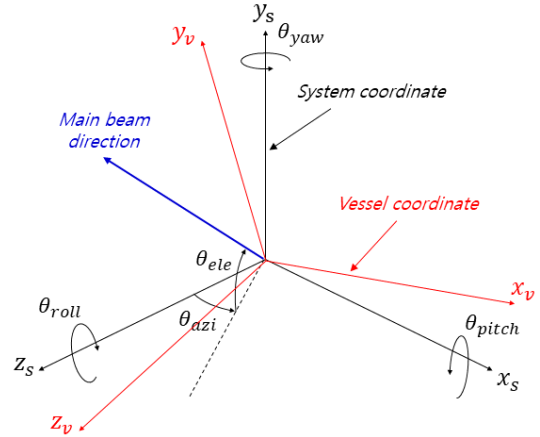
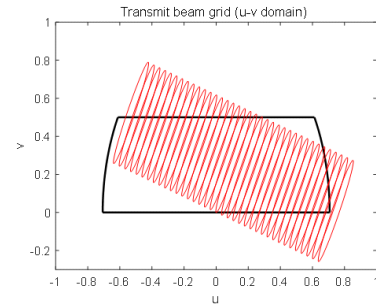


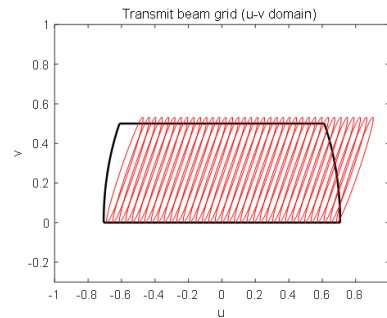
그림 1. 좌표계 정의

Fig. 1. Coordinate system definition.

방향으로 빔을 송신하는 과정이며, 보상 전후의 빔 송신 영역은 그림 2와 같다.



(a) 전자빔 보상 전
(a) Before compensation



(b) 전자빔 보상 후(Roll 방향 22° 요동 시)
(b) After compensation (22° rotation in the roll direction)

그림 2. 빔 송신 영역

Fig. 2. Transmit beam area.

그림 2는 보상 전후의 빔 송신 영역을 나타내는 그림이다. 검은색 테두리로 표시된 영역은 탐색영역이며, azimuth 방향 $-45^\circ \sim 45^\circ$, elevation 방향 $0 \sim 30^\circ$ 영역을 탐색영역으로 설정한 경우를 나타낸다. 또한, 빨간색 타원은 코시컨트 제곱빔의 3 dB 빔폭 범위를 나타낸다. 요동값은 함정의 크기에 따라서 달라지며, 고속정과 같은 경우 roll 방향 22° 까지 요동이 발생하기 때문에 roll 방향 22° 최대 요동을 가정하였다^[2]. 코시컨트 제곱빔을 운용하는 상황이며, 요동값이 큰 경우에는 그림 2(a)에서 볼 수 있는 것처럼 전자빔 보상 전에 탐색영역에서 송신 빔이 많이 벗어나 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 2(b)는 전자빔 보상 후의 그림이며, 보상 전과 비교할 때 대부분의 탐색영역을 커버하고 있다. 하지만, roll 방향 요동의 경우 빔의 회전을 야기하기 때문에 2차원 평면의 빔 이동을 통한 보상만으로는 모든 영역을 커버하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 모든 탐색영역을 커버하기 위해서는 빔 회전에 대한 보상 또한 필요하다.

III. 제안하는 전자빔 보상방법

제안하는 전자빔 보상방법은 roll 방향 요동에 의한 빔 회전을 보상하는 매커니즘이 추가된 방법이다. 따라서 제안하는 전자빔 보상방법은 “요동값 확인 → 빔 회전 보상 → 2차원 평면의 빔 이동을 통한 보상” 순서로 진행된다. 빔 회전 보상을 위해서는 회전값에 따른 코시컨트 제곱빔 회전이 필요하며, roll 방향 22° 요동에 의해 빔이 회전했다면 22° 만큼 반대 방향으로 빔을 회전에 주어야 한다.

코시컨트 제곱빔의 빔 회전은 배열에 인가되는 초기 크기 위상값을 도출해내는 과정이며, 그림 3(a)와 같은 배열에서 빔을 형성하는 수식은 식 (2)와 같다.

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{mn} e^{jk[p x_{mn} \sin\theta \cos\phi + p y_{mn} \sin\theta \sin\phi]} \quad (2)$$

식 (2)에서 I_{mn} 은 빔 형성을 위해 각 소자에 급전되는 초기값, $p x_{mn}$, $p y_{mn}$ 은 각 소자의 x 방향, y 방향 위치, M , N 은 각각 x 방향, y 방향으로의 소자수, $k=2\pi/\lambda$ 로 표현되는 전 파상수이다. F 라는 함수로 정의되는 코시컨트 제곱빔을 형성하기 위한 초기값을 I_{mn} 이라 할 때, roll 방향 회전에

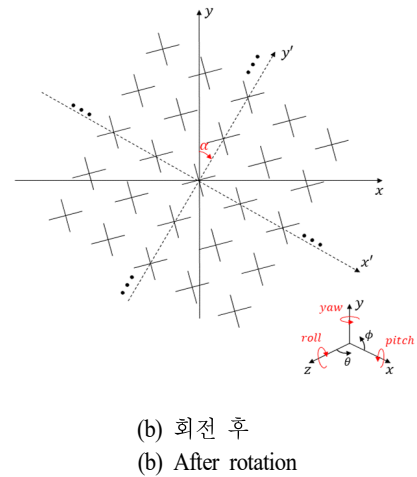
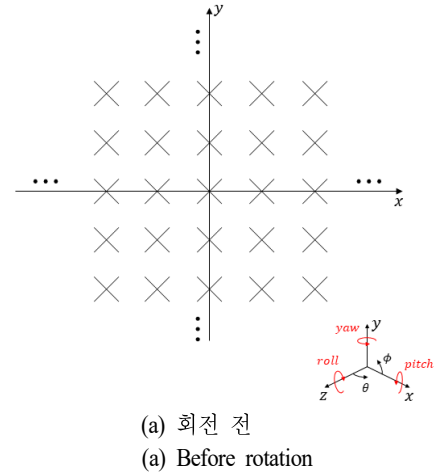


그림 3. Roll 방향 회전에 따른 좌표 정의

Fig. 3. Coordinate definition when rotating in the roll direction.

의한 빔 회전 보상을 하는 경우 F 라는 새로운 빔 형상의 구현이 필요하다. 이로 인하여, 빔 회전 보상을 위해서는 회전각에 대응되는 새로운 I_{mn} 값의 도출이 필요하다. 최적화를 이용하여 이 과정을 수행하는 것은 많은 시간이 소요되며, 본 논문에서는 superposition 방법을 활용하여 빔을 회전하였다.

Superposition 방법은 여러 개의 펜슬빔을 합성하여 원하는 빔을 구현하는 방법이다. Superposition 방법을 이용하여 빔형성에 필요한 급전 신호 정보를 도출하는 수식은 식 (3)과 같다^[5].

$$I_{mn} = \sum_i^K b_i e^{-jk(px_{mn}\sin\theta_i\cos\phi_i + py_{mn}\sin\theta_i\sin\phi_i)} \quad (3)$$

식 (3)에서 K 는 전체 소자수, θ_i , ϕ_i 는 각각 빔 형성을 위한 i 번째 팬슬빔의 조향각도이며, b_i 는 i 번째 팬슬빔에 적용되는 가중치이다.

$F(\theta, \phi)$ 라는 함수로 정의되는 빔 형상을 가정할 때, $F(\theta, \phi)$ 를 roll 방향으로 회전시키기 위하여 그림 3(b)와 같이 각 복사소자의 좌표를 재정의하였다. 재정의된 좌표에 대한 식은 식 (4) 및 식 (5)와 같다.

$$x' = x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) \quad (4)$$

$$y' = x \sin(\alpha) + y \cos(\alpha) \quad (5)$$

식 (4) 및 식 (5)에서 x' , y' 은 roll 방향 회전에 따라 재정의된 각 복사소자의 좌표이며, x , y 는 회전 전의 좌표, α 는 roll 방향 회전 각도를 의미한다. 그림 1(b)의 좌표계에 대하여 $F(\theta, \phi)$ 라는 빔 형상을 구현하면, 이것은 그림 3(a) 좌표계 관점에서 $F(\theta, \phi)$ 가 α 만큼 회전된 것을 의미한다. 따라서, 식 (4), (5)를 이용하여 x' , y' 를 계산한 후, 이 좌표 값을 식 (3)의 px_{mn} , py_{mn} 에 각각 대입하면 roll 방향 회전을 위한 급전 신호 정보를 도출할 수 있다.

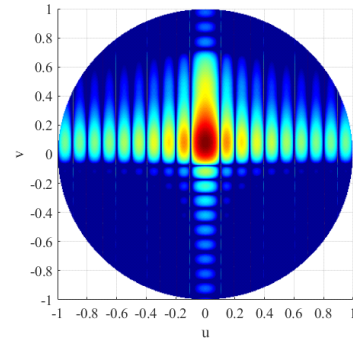
앞서 서술한 빔 회전 방법을 이용하여 빔 회전 보상 후, 2차원 빔 이동을 통하여 함정 요동에 대한 전자적 빔 보상을 수행하였다. 20×20 배열을 구성하여 코시컨트 제곱 빔을 형성하였으며, 본 논문에서 구현한 코시컨트 제곱빔의 형상은 거리 $7t$ km와 고도 t km를 커버하기 위하여 식 (6)과 같은 식으로 정의된다^[6].

$$F(\theta, \phi) = \begin{cases} \csc^2 8^\circ & (0^\circ < \theta < 8^\circ, \phi = 90^\circ) \\ \csc^2 \theta & (8^\circ < \theta < 40^\circ, \phi = 90^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

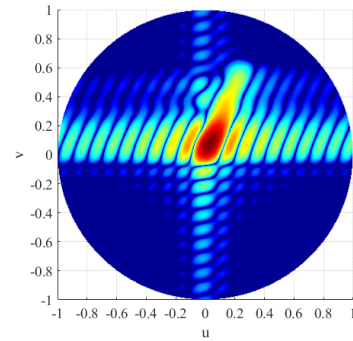
정의된 코시컨트 제곱빔을 roll 방향으로 22° 회전시키기 위하여, 식 (4) 및 식 (5)를 이용하여 22° 만큼 회전하였을 때의 좌표값을 추출하였다. 이 값을 식(3)에 대입하였으며, 회전된 좌표에 대하여 식 (6)과 같은 빔을 형성하도록 I_{mn} 을 계산하였다. 최적화 방법을 이용한 I_{mn} 값 도출에는 약 30분이 소요되는 반면 superposition 방법을 이용한 I_{mn} 계산에는 0.043초가 소요되었으며, 이로 인하여 빔 회전 보상에 superposition 방법이 더 적합함을 알 수 있다.

계산된 I_{mn} 을 그림 3(a)에 적용하면 22° 만큼 회전된 빔을 구현할 수 있으며, 그림 4에서 형상을 확인할 수 있다. 그림 4는 코시컨트 제곱빔의 2D 형상을 나타낸다. 그림 4(a)는 roll 방향 회전을 적용하기 이전의 빔 형상이며, 그림 4(b)는 roll 방향으로 빔을 22° 회전시킨 형상이다.

코시컨트 제곱 빔의 형상을 유지하면서 빔이 roll 방향으로 22° 만큼 회전된 것을 확인할 수 있으며, 이로 인하여 빔 회전 보상을 수행할 수 있다. 회전 보상을 포함한 전자빔 보상 후의 빔 송신 영역은 그림 5와 같다. 그림 5는 제안하는 전자빔 보상 후의 빔 송신 영역을 나타낸다. Roll 방향 7° , 22° 요동에 대하여 제안하는 방법을 적용하였으며, 그림 5(a)에서 볼 수 있듯이 요동이 발생함으로써 빔의 회전이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이러한 빔의 회전을 보상하기 위하여 superposition 방법을 이용하여 요



(a) 정면 방향
(a) Center direction



(b) Roll 방향 22° 회전 시
(b) 22° rotation to roll direction

그림 4. 코시컨트 제곱 빔의 2D 형상

Fig. 4. Configuration of cosecant squared beam in 2D plane.

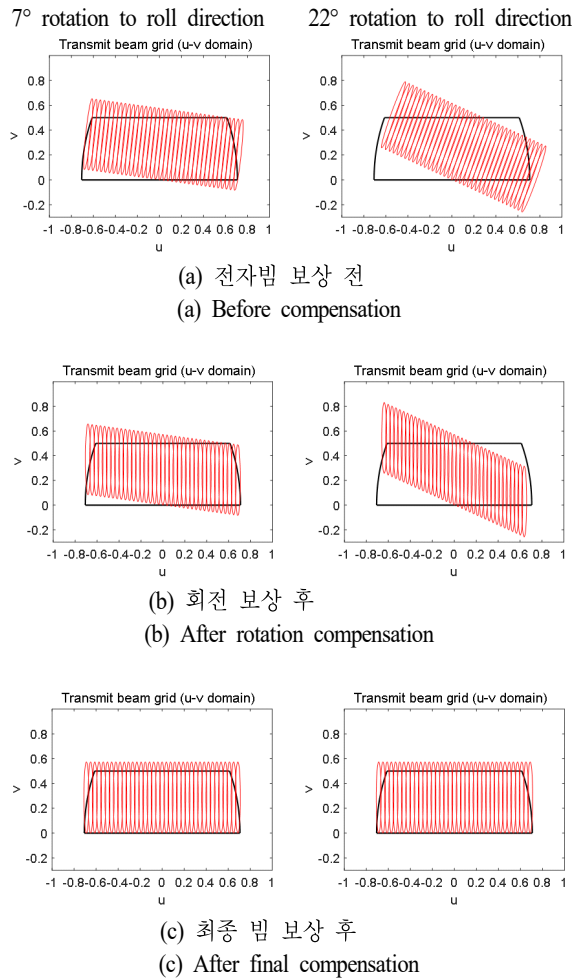


그림 5. 빔 송신 영역
Fig. 5. Transmit beam area.

동값만큼 회전된 빔을 형성하였다. 이러한 빔을 형성하여 회전에 대한 보상을 한 이후의 송신빔 영역은 그림 5(b)와 같다. 빔 회전 보상을 함으로써 시스템 좌표계 상에서 요동 이전과 같은 형상의 송신빔이 형성되었으며, 각각의 송신빔을 요동값만큼 2D 평면상에서 이동시켜주면 전자빔 보상 과정이 완료된다. 최종적인 전자빔 보상 이후의 빔 송신 영역은 그림 5(c)와 같다. 전자빔 보상 이후에도 탐색 영역을 모두 커버하지 못했던 기존 방법과는 달리, 제안하는 방법을 이용하는 경우 설정된 탐색영역을 송신빔이 모두 커버하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여, 요동값이 큰 경우에도 제안하는 방법을 이용한 전자빔 보상이 유효함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 빔 회전에 대한 보상을 이용하여, 함정 요동값이 큰 경우에도 가능한 전자빔 보상방법을 제안하였다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 20×20 배열을 구성하여 코시컨트 제곱빔을 형성하였으며, superposition 방법과 좌표계 재정의의 통하여 코시컨트 제곱빔의 roll 방향 회전이 수행됨을 보였다. 이를 이용하여 빔 회전 보상과 2차원 빔 이동을 통하여 전자빔 보상을 수행하였으며, 요동값이 큰 경우에도 빔 송신 영역이 설정한 탐색영역을 모두 커버함을 확인하였다. 따라서 제안된 전자빔 보상방법은 함정용 전자빔 보상 시스템에 유용하게 쓰일 것으로 생각된다.

References

- [1] M. J. Lee, S. G. Kim "Electronic beam stabilization algorithm for ship-borne surveillance radar," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea TC*, vol. 41, no. 2, pp. 71-75, Feb. 2004.
- [2] Y. J. Lee, "Improvement of electronic beam stabilization algorithm for surveillance radar," *Journal of the Electronics and Information Engineers*, vol. 56, no. 6, pp. 685-690, Jun. 2019.
- [3] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, New York, NY, John Wiley & Sons, 1997.
- [4] K. H. Kim, H. Kim, D. Y. Kim, and H. S. Jin, "Development of planar active phased array antenna for detecting and tracking radar," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 12, pp. 924-934, Dec. 2018.
- [5] Y. X. Qi, J. Y. Li, "Superposition synthesis method for 2-D shaped-beam array antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 6950-6957, Dec. 2018.
- [6] M. C. Chang, W. C. Weng, "Synthesis of cosecant array factor pattern using particle swarm optimization," in *2013 International Symposium on Antennas & Propagation (ISAP 2013)*, Nanjing, Oct. 2013, pp. 948-951.

윤 주 호 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9821-3351>



2016년 2월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)
2021년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학박사)
2021년 8월~현재: 한화시스템(주) 전문연구원
[주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, 능동

위상 배열 시스템

윤 기 철 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4216-1713>



2011년 2월: 성균관대학교 기계공학부 (공학사)
2013년 2월: 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)
2016년 12월: 펜실베이니아 주립대학교 기계원자력공학부 (공학박사)
2016년 10월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 레이더 체계설계 등

백 지 응 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3610-3258>



2015년 8월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학사)
2017년 8월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2021년 8월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학박사)
2021년 5월~현재: 한화시스템(주) 전문연

구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 배열 신호처리, 압축센싱

김 관 성 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7385-4141>



2002년 2월: 부산대학교 전기전자공학부 (공학사)
2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2020년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2007년 2월~현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템설계 및 성능분석, 신호처리 등

박 종 일 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2045-0514>



2002년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
2005년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)
2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학박사)
2011년 5월~2012년 4월: 포항공과대학교

미래정보기술사업단 연구원

2012년 9월~2016년 12월: 한국전자통신연구원

2017년 1월~2017년 6월: 한국과학기술원 인공위성연구센터

2018년 1월~현재: 한화시스템(주) 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 영상, 레이더 표적탐지 및 식별, 패턴인식