

바이스태틱 MIMO 레이다 시스템의 위치탐지 무력화를 위한 신호공간 재밍 기법

Signal-Space Jamming Scheme for Disturbing Target Localization of Bistatic MIMO Radar System

여 광 구 · 정 원 주

Kwanggoo Yeo · Wonzoo Chung

요 약

본 논문은 분산 배치된 다수의 전자전 센서를 통하여 수신된 바이스태틱 multiple-input multiple-output(MIMO) 레이다 시스템의 신호를 조합하여 레이다 시스템의 위치탐지 기능을 무력화 혹은 기만하는 재밍 설계기법을 제안한다. 제안된 기법은 하나의 전자전 센서에서 수집된 신호를 특정주기로 지연시킨 신호들의 합을 송신하거나, 다수의 센서에서 수집된 신호들의 가중치 합을 송신하여, 표적을 탐지 못하게 하거나 허위표적을 발생시킨다. 시뮬레이션 결과를 통해서 제안된 기법의 재밍 성능을 확인한다.

Abstract

A jamming design scheme to disturb target position estimation of a bistatic multiple-input multiple-output(MIMO) radar system is presented. The proposed method exploits the received signals from distributed multiple electronic sensors and combines them to produce a jamming signal. The proposed algorithm can eliminate the target by transmitting the delayed sum or the weighted sum of the received sensor signals. Simulation results confirm the performance of the proposed method.

Key words: Bistatic MIMO Radar, Jamming, Direction-of-Departure, Direction-of-Arrival, MUSIC, Matrix Pencil

I. 서 론

최근 대두하는 multiple-input multiple-output(MIMO) 레이다 시스템은 다수의 안테나로 구성된 송·수신 배열로 이루어진 시스템으로 송신 안테나 배열에서 직교파형을 송신하고, 수신 안테나 배열에서 정합필터를 사용하여 표적에 의해 반사된 각 송신 파형에 대한 정보를 개별적으

로 추출할 수 있어서 파라미터 추정, 표적의 위치추정 및 탐지에 대하여 높은 성능을 갖는다^[1]. 특히 이에 더하여 송신 안테나 배열과 수신 안테나 배열이 물리적으로 분리된 바이스태틱 구조는 스텔스기 같은 저피탐 물체의 탐지 성능을 높인다^[2]. 바이스태틱 MIMO 레이다 시스템에 관한 연구가 활발히 진행됨에 따라 이러한 시스템에 대응하는 재밍연구 역시 주목을 받고 있다.

「이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 전자전 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.」

고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과(Department of Computer and Communication Engineering, Korea University)

· Manuscript received September 12, 2018 ; Revised November 2, 2018 ; Accepted November 2, 2018. (ID No. 20180912-097)

· Corresponding Author: Wonzoo Chung (e-mail: wchung@korea.ac.kr)

바이스테틱 MIMO 레이다 시스템을 무력화하는 재밍 연구로는 최악의 경우를 기반으로 하는 재밍신호설계연구^[3] 등이 있으나, 이는 기존의 고출력 협대역 재밍신호에 대하여 잡음 및 간섭 억제에 강인하도록 재밍신호를 설계하는 것이다. 그러나 고출력의 재밍신호에 대한 재밍억제기법^{[4][5]}이 여러 연구되었기 때문에 신호공간(signal-space) 내에서 표적에 의해 반사된 직교신호와 분간하기 어려운 저출력 재밍신호에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 전자전 센서를 통하여 탐지된 신호를 조합하여 바이스테틱 MIMO 레이다 시스템의 위치탐지 기능을 무력화하는 재밍신호 설계기법을 제안하고자 한다. 제안 기법은 하나의 센서에서 수신된 신호를 특징주기로 지연시킨 신호들의 합 또는 여러 센서에 의해 수집된 신호들의 가중치 합으로 설계된 재밍신호를 송신하여 위치탐지에 사용하는 수신신호의 상위 고유치(dominant eigenvalues)의 개수를 변화시켜 위치탐지 기능을 무력화시킨다.

본 논문의 구성은 Section II에서 바이스테틱 MIMO 레이다의 신호 모델을 설명하고 Section III에서 제안방법을 설명하며, Section IV에서 시뮬레이션을 통해서 제안방법의 성능을 검증하였다.

II. 신호 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 M_t 개의 안테나로 구성된 송신 안테나 배열과 물리적으로 다른 곳에 위치하는 M_r 개의 안테나로 구성된 수신 안테나 배열로 이루어진 바이스테틱 MIMO 레이다 시스템과 far-field 범위에 분산

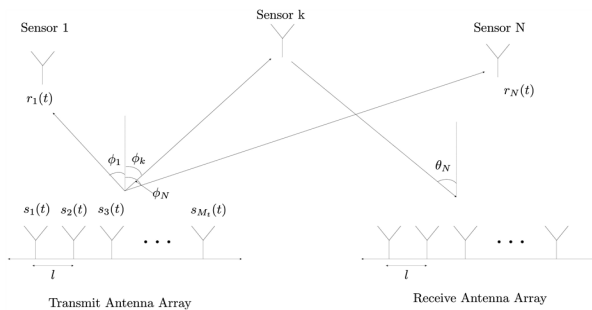


그림 1. 바이스테틱 MIMO 레이다 시스템 및 센서 배치
Fig. 1. A bistatic MIMO radar system and distributed electronic sensors.

배치된 N 개의 전자전 센서 검 표적을 고려한다.

송신 안테나 배열의 각 안테나는 각각 서로 다른 직교신호 $s_i(t)$ ($i = 1, \dots, M_t$)를 송신한다. 이때 k 번째 센서에 수신된 신호는 식 (1)과 같다.

$$r_k(t) = \rho_k \sum_{i=1}^{M_t} s_i(t) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} l_i \sin(\theta_k)} + n(t) \quad (1)$$

여기서 ρ_k 는 k 번째 센서의 신호의 크기, λ 는 신호의 파장, l_i 는 안테나 배열에서 첫 번째 안테나에 대한 i 번째 안테나의 상대적 위치이며, θ_k 는 k 번째 센서에 대한 DOD(direction-of-departure)이고, $n(t)$ 는 additive white Gaussian noise (AWGN)이다. k 번째 표적(센서)에 의해 반사되어 수신 안테나 배열의 i 번째 안테나에 수신된 신호는 식 (2)와 같다.

$$x_i^k(t) = \alpha_k(t) r_k(t) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} l_i \sin(\phi_k)} \quad (2)$$

여기서 $\alpha_k(t)$ 는 k 번째 표적의 수신 신호 크기, ϕ_k 는 k 번째 표적에 대한 DOA(direction-of-arrival)를 의미한다. N 개의 표적에 대하여 수신 안테나 배열의 모든 안테나의 출력을 벡터화하여 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\vec{x}(t) = \sum_{j=1}^N \alpha_j(t) \vec{b}(\theta_j) \vec{a}^T(\phi_j) \vec{s}(t) + \vec{n}(t) \quad (3)$$

여기서 송신 조향벡터, 수신 조향벡터, 신호벡터는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \vec{a}(\phi_j) &:= \left[1 e^{j \frac{2\pi}{\lambda} l_2 \sin(\phi_j)} \dots e^{j \frac{2\pi}{\lambda} l_{M_t} \sin(\phi_j)} \right] \\ \vec{b}(\theta_j) &:= \left[1 e^{j \frac{2\pi}{\lambda} l_2 \sin(\theta_j)} \dots e^{j \frac{2\pi}{\lambda} l_{M_r} \sin(\theta_j)} \right] \\ \vec{s}(t) &:= [s_1(t) s_2(t) \dots s_{M_t}(t)]. \end{aligned} \quad (4)$$

수신단에서는 다음의 식 (5)와 같이 정합필터를 통하여 각 송신파형의 정보를 개별적으로 획득한다.

$$\begin{aligned} &\vec{x}_{mo}(t) \\ &= \vec{x}(t) \vec{s}^H(t) \\ &= \sum_{j=1}^N \alpha_j(t) \vec{b}(\theta_j) \vec{a}^T(\phi_j) \vec{s}(t) \vec{s}^H(t) + \vec{n}(t) \vec{s}^H(t) \\ &= \sum_{j=1}^N \alpha_j(t) \vec{b}(\theta_j) \vec{a}^T(\phi_j) + \vec{n}(t) \vec{s}^H(t). \end{aligned} \quad (5)$$

바이스태틱 MIMO 레이다 시스템은 정합필터 출력신호 $\vec{x}_{mo}(t)$ 로부터 표적의 DOD, DOA를 추정하여 표적의 위치를 탐지한다. 이때 사용되는 대표적인 추정 알고리즘은 2-D MUSIC^[6], 2-D matrix pencil^[7] 등이 있다. 이러한 알고리즘들은 수신신호 또는 수신신호의 공분산행렬의 상위 고유치 개수를 조사하여 표적의 수를 추정하고, 신호공간(signal-subspace)과 잡음공간(noise-subspace)을 구분한 후, 신호공간 또는 잡음공간을 이용하여 표적의 DOD, DOA를 추정한다. 따라서 상위 고유치의 개수를 교란하면 바이스태틱 MIMO 레이다 시스템의 위치탐지 기능을 무력화시킬 수 있다. 본 논문의 목표는 상위 고유치의 개수를 변화시키는 저출력 재밍신호를 설계하는 것이다.

III. 제안 기법

바이스태틱 MIMO 레이다는 분산 시스템이므로 모노스태틱 레이다와 달리 고출력 지향성 재밍공격에 대하여 일반적으로 강인한 성질을 갖고 있다^[8]. 이러한 바이스태틱 MIMO 레이다의 작동원리를 역이용하여 재밍신호의 파워와 주파수 특성 (대역, 스펙트럼 특성)으로는 탐지될 수 없는 재밍신호를 생성하여 특정한 표적을 숨기거나 허위표적을 만드는 재밍신호 발생기법을 제안하고자 한다.

3-1 Delayed Sum 기법

k 번째 센서에서 수집된 신호를 주기 T_d 로 지연시킨 N_d 개의 신호의 합을 송출한다.

$$y(t) = \frac{1}{N_d} \sum_{m=1}^{N_d} r_k(t - mT_d) \quad (6)$$

식 (6)의 재밍신호로 인하여 k 번째 센서에 대한 조향벡터에 대응되는 고유치의 크기가 작아져 그림 2와 같이 상위 고유치의 개수가 줄어든다.

3-2 Weighted Sum 기법

N 개의 센서 중 N_w 개의 센서에서 수집된 신호를 가중치 합(weighted sum)으로 송출한다.

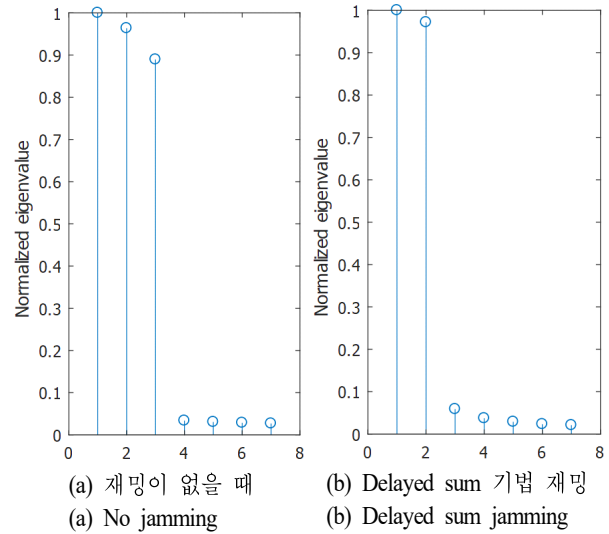


그림 2. 수신신호의 정규화된 고유치

Fig. 2. Normalized eigenvalues of received target signals.

$$y(t) = \sum_{j=1, j \neq k}^{N_w} \beta_j r_j(t) \quad (7)$$

k 번째 표적과 바이스태틱 거리와 DOD는 다르지만 ($\phi_s \neq \phi_k$) 송신단으로부터 거리가 같은 s 번째 센서를 가정하자. s 번째 센서에 수집된 신호로 $\beta_s = 1$ 로 생성된 k 번째 센서에서 송신하는 재밍신호는

$$y(t) = r_s(t) = \vec{a}^T(\phi_s) \vec{s}(t) \quad (8)$$

이므로 수신단에서 수신 후 정합필터를 통과한 신호는 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \vec{x}_{mo}(t) &= \sum_{j=1}^N \alpha_j(t) \vec{b}(\theta_j) \vec{a}^T(\phi_j) + \alpha_s(t) \vec{b}(\theta_k) \vec{a}^T(\phi_s) \\ &+ \vec{n}(t) \vec{s}^H(t) \\ &= \sum_{j=1}^{N+1} \alpha_j(t) \vec{b}(\theta_j) \vec{a}^T(\phi_j) + \vec{n}(t) \vec{s}^H(t). \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)로부터 위치추정을 할 경우, 그림 3처럼 상위 고유치의 개수가 하나 증가하여 추정되는 표적의 수가 많아진다. 다른 바이스태틱 거리에 위치하는 s 번째 센서가 k 번째 센서가 같은 바이스태틱 거리에 허위표적으로 추

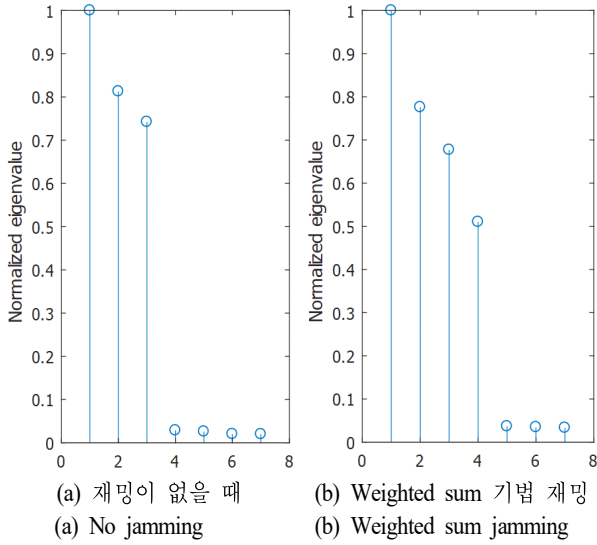


그림 3. 수신신호의 정규화된 고유치
Fig. 3. Normalized eigenvalues of received target signals.

정되므로 weighted sum 기법으로 위치기만이 가능하다. 송신단으로부터의 거리가 다르다고 하더라도 본래의 바이스태틱 거리와는 다른 거리에서 추정되기 때문에 위치기만이 가능하다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 재밍신호 설계기법의 성능을 확인하기 위하여 수신신호에 2D-MUSIC과 2-D matrix pencil을 적용한 결과를 도시하였다. 바이스태틱 MIMO 레이다 시스템에 사용된 송·수신 안테나 배열은 $M_t = M_r = 20$ 개의 안테나로 구성되었고, 각각의 DOD, DOA가 $(67.5^\circ, 22.5^\circ)$, $(45^\circ, 45^\circ)$, $(22.5^\circ, 67.5^\circ)$ 인 3개의 표적을 가정하였다. 송신 안테나 배열에서 송신하는 직교신호는 hadamard code를 사용하였다.

그림 4는 delayed sum 재밍신호를 사용한 $(45^\circ, 45^\circ)$ 표적(target 2)과 다른 두 표적(target 1, 2)의 power spectral density(PSD)를 비교하였다. 재밍신호가 저출력 신호이기 때문에 PSD만으로는 재밍 여부를 판단할 수 없음을 알 수 있다.

그림 5는 delayed sum 재밍 신호를 사용하기 전(왼쪽)과 후(오른쪽)의 수신신호에 2D-MUSIC을 적용한 결과이

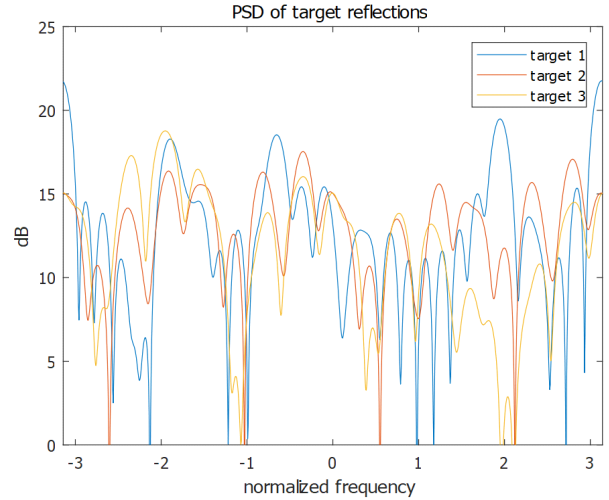


그림 4. Delayed sum 기법으로 재밍된 수신신호의 PSD
Fig. 4. PSD of received target signals jammed by delayed sum method..

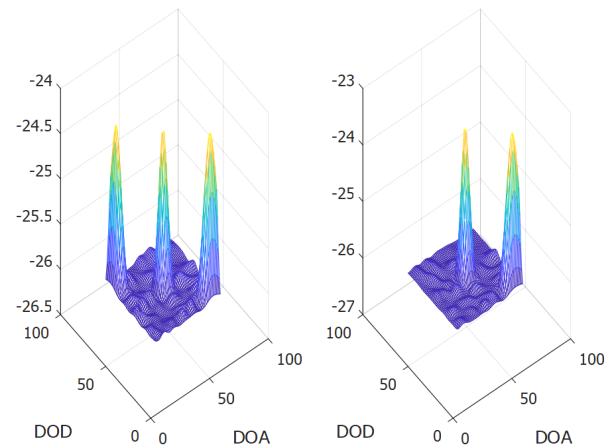


그림 5. Delayed sum 기법으로 재밍된 수신신호의 2-D MUSIC 추정 결과
Fig. 5. Results of 2-D MUSIC to the received target signals jammed by delayed sum method.

다. Delayed sum 기법으로 설계된 신호를 사용하여 $(67.5^\circ, 22.5^\circ)$ 표적이 스펙트럼에 나타나지 않고 2개의 표적만 나타나는 것을 통해서 2D-MUSIC의 위치추정 기능이 무력화됨을 확인할 수 있다.

그림 6은 delayed sum 재밍신호를 사용하기 전과 후의 수신신호에 matrix pencil 기법을 적용한 결과이다. 2-D

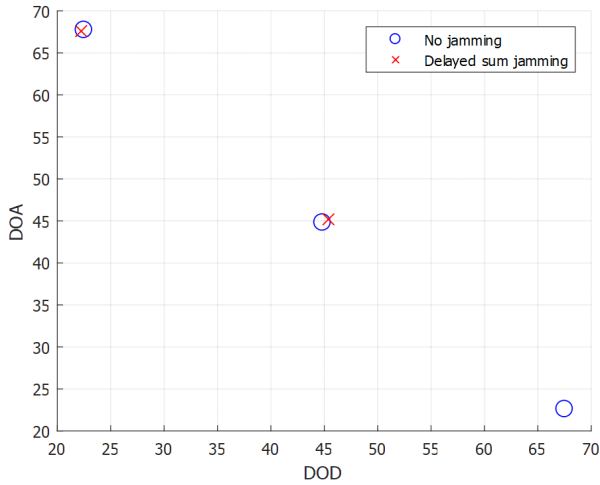


그림 6. Delayed sum 기법으로 재밍된 수신신호의 2-D matrix pencil 추정 결과
 Fig. 6. Results of 2-D matrix pencil method to the received target signals jammed by delayed sum method.

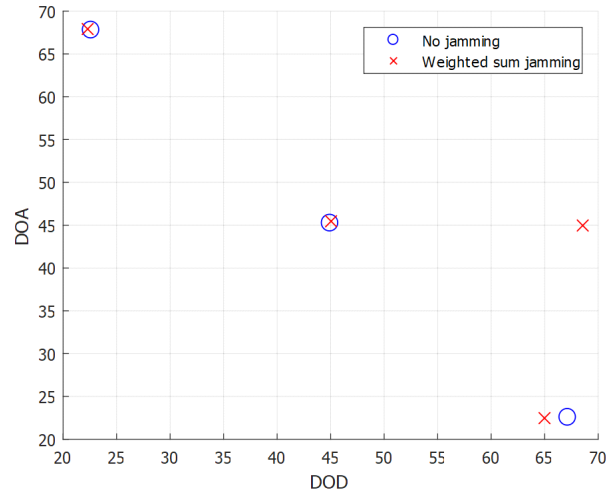


그림 8. Weighted sum 기법으로 재밍된 수신신호의 2-D matrix pencil 추정 결과
 Fig. 8. Results of 2-D matrix pencil to the received target signals jammed by weighted sum method.

MUSIC의 결과와 마찬가지로 matrix pencil 기법으로도 위치추정에 실패하는 것을 볼 수 있다.

Weighted sum 재밍신호를 사용했을 때 2-D MUSIC과 matrix pencil 기법의 시뮬레이션 결과는 그림 7과 그림 8에 각각 나타나 있다. 재밍신호는 송신 안테나배열로부터 (45°, 45°) 표적과 같은 거리에 위치하는 (65.5°, 45°) 센서

에서 수집한 신호로 구성하였다. 각각의 그림에서 원래의 3개의 표적 외에 (68.5°, 45°)에 허위표적이 나타난 것을 확인 할 수 있다. 이는 weighted sum 기법으로 설계한 재밍신호가 레이더 시스템의 위치추정을 교란 가능함을 보여준다.

V. 결 론

본 논문은 바이스태틱 MIMO 레이더 시스템의 위치추정기능을 무력화하는 재밍설계 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 하나의 센서에서 수집된 신호를 특정주기로 지연시킨 신호들의 합하거나 여러 센서에서 수집된 신호들의 가중치 합으로 저출력 재밍신호를 생성하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 기법으로 인하여 수신신호의 상위 고유치 개수가 교란되어 레이더 시스템이 표적을 탐지 못하거나 허위표적을 탐지하는 것을 확인하였다.

References

[1] E. Fishler, A. Haimovich, R. S. Blum, L. J. Cimini, D. Chizhik, and R. A. Valenzuela, "Spatial diversity in radars-models and detection performance," *IEEE Transactions*

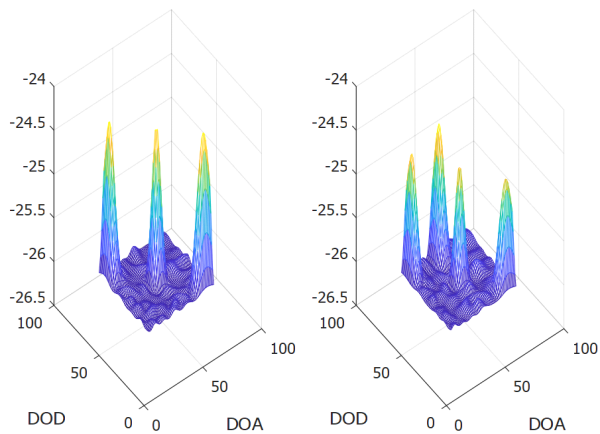


그림 7. Weighted sum 기법으로 재밍된 수신신호의 2-D MUSIC 추정 결과
 Fig. 7. Results of 2-D MUSIC to the received target signals jammed by weighted sum method.

- on *Signal Processing*, vol. 54, no. 3, pp. 823-838, Mar. 2006.
- [2] M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm, B. Beckley, P. Mark, and A. Richards, *Principle of Modern Radar vol 1: Basic Principles*, SciTech Publishing Inc., pp. 18-25, 2010.
- [3] T. Aittomaki, V. Koivunen, "Worst-case jamming signal design and avoidance for MIMO radars," in *2016 24th European Signal Processing Conference(EUSIPCO)*, Budapest, Aug. 2016, pp. 2220-2224.
- [4] M. J. Jahromi, M. H. Kahaei, "Two-dimensional sparse solution for bistatic MIMO radars in the presence of jammers," in *2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering(ICEE)*, Tehran, May 2014, pp. 1755-1759.
- [5] K. Lee, W. Kang, Y. S. Chung, H. G. Yang, and J. M. Kim, "A new jammer suppression method in MIMO radar using matrix pencil method and generalized likelihood ratio test," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2015, p. 802471, 2015.
- [6] X. Zhang, L. Xu, and D. Xu, "Direction of Departure (DOD) and Direction of Arrival(DOA) estimation in MIMO radar with reduced-dimension MUSIC," *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 1161-1163, Dec. 2010.
- [7] X. Wang, W. Wang, D. Xu, and J. Wang, "Matrix pencil method for bistatic MIMO radar with single snapshot," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. 97, no. 2, pp. 120-122, Feb. 2014.
- [8] K. Yeo, Y. Chung, H. Yang, J. Kim, and W. Chung, "Reduced-dimension DOD and DOA estimation through projection filtering in bistatic MIMO radar with jammer discrimination," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 11, no. 8, pp. 1228-1234, Apr. 2017.

여 광 구 [고려대학교/석·박사 통합과정]



2012년 2월: 고려대학교 컴퓨터·통신공학부 (공학사)
 2012년 3월~현재: 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 석·박사 통합과정
 [주 관심분야] Digital Signal Processing for MIMO RADAR

정 원 주 [고려대학교/정교수]



1989년 2월: 고려대학교 수학과 (이학사)
 1999년 2월: Cornell University Electrical Engineering (공학석사)
 2002년 2월: Cornell University Electrical Engineering (공학박사)
 2002년~2005년 (주)Dotcast, Senior System Architect로 근무
 2008년~현재: 고려대학교 컴퓨터학과 정교수
 [주 관심분야] Digital Signal Processing for Digital Communications Systems, MIMO RADAR