

분산 다중 전자전 센서를 이용한 ESPRIT 기반 비등간격 선형배열 MIMO 레이더의 암맹 직교신호 분리 기법

Blind Waveform Estimation Scheme Based on ESPRIT for Nonuniform Linear Array MIMO Radars Using Distributed Multiple Electronic Sensors

여 광 구 · 정 원 주

Kwanggoo Yeo · Wonzoo Chung

요 약

본 논문에서는 안테나 배열 간격이 등간격 선형배열(uniform linear array)이 아닌 비등간격 선형배열인 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 레이더의 직교신호 분리에 대하여 논의한다. 다중의 전파탐지기를 이용하여 얻은 신호를 기반으로 전파탐지기 배치를 통하여 새로운 rotational invariance 구조를 부여하여 ESPRIT 알고리즘을 이용할 수 있게 한다. 이를 통하여 수신신호로부터 직접 MIMO 레이더의 직교신호를 간단한 연산으로 암맹적으로 분리하는 방법을 제시한다. 추정된 직교신호를 이용하여 차후 MIMO 레이더의 무력화 혹은 기만에 활용할 수 있도록 한다.

Abstract

In this paper, we propose a blind estimation scheme for the antenna spacing of nonuniform linear array MIMO radar using distributed electronic sensors based on ESPRIT. We present a blind method to separate orthogonal waveforms of a MIMO radar based on the antenna spacing estimation. The estimated orthogonal waveforms of a MIMO radar can be used for disabling opponent MIMO radars.

Key words: MIMO Radar, Waveform Extraction, Blind Parameter Estimation, Non-ULA MIMO Radar

I. 서 론

Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) 레이더는 기존의 위상배열(phased array) 레이더와는 달리 같은 신호를 배열 안테나마다 다른 위상으로 보내지 않고 각기 다른 직교파형신호(orthogonal waveform)를 내보낸다. 그렇게 함으로써 한 번에 추정 가능한 다중 표적 개수를 늘리고, 움

직이는 표적에 대한 추적성능을 향상시키며, 특히 스텔스 목표물에 대한 추정 성능을 높이기 때문에 차세대 레이더 기술로 주목을 받는다^{[1]~[5]}. 기존의 Single-Input Single-Output(SISO) 레이더에서 탐지를 교란하기 위해 개발된 다양한 기술들이 주로 송출신호의 특징인 고유의 펄스 반복 주기(pulse repetition interval: PRI)를 추정하는 것에서 시작하였다면^[6], 새로운 기술인 MIMO 레이더를 무력

「The authors gratefully acknowledge the support from Electronic Warfare Research Center at Gwangju Institute of Science and Technology(GIST), originally funded by Defense Acquisition Program Administration(DAPA) and Agency for Defense Development(ADD).」

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

· Manuscript received October 5, 2018 ; Revised October 30, 2018 ; Accepted November 11, 2018. (ID No. 20181005-104)

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

화하기 위해서는 MIMO 레이다에서 각 서브 송신 안테나의 직교파형신호를 알아내는 것이 필수적이다. 수신 MIMO 레이다 신호는 서브 안테나 배열에 따른 위상 변화된 직교신호들의 합으로 구성되어 있다. 따라서 각 직교신호를 추출하기 위해서는 이론적으로 각 안테나 개수보다 많은 센서를 사용하여 충분히 많은 합성신호를 수집한 후 선형적으로 분리해야 한다. 이때 각 센서에 수집된 합신호를 이루는 직교신호들의 위상변화를 아는 것이 중요하다. 대부분의 기존연구에서처럼 MIMO 레이다의 서브 안테나가 등간격 선형(ULA)으로 배치되어 있다는 가정이 있다면, 실제 간격에 상관없이 ESPRIT(Estimation of Signal Parameters Using Rotational Invariance)^[7] 알고리즘을 이용하여 간단하게 직교신호를 추출할 수 있다^[8]. 보다 일반적인 경우의 직교파형신호 추출은 암맹 신호원 분리 문제(blind source separation)^[9]의 범주에 들어가는 문제로서 상당한 복잡도를 피할 수 없다^[8]. 이에 등간격 선형의 경우에서처럼 ESPRIT 알고리즘을 이용한 간단한 직교신호 추출 알고리즘이 비등간격 선형(non-ULA) 경우에도 선호된다.

본 논문에서는 전자파 탐지 센서의 위치를 조정함으로써 비등간격 선형배열 MIMO 레이다에서 ESPRIT 알고리즘을 활용하여 직접 직교신호를 추출하고, 안테나 배열 간격을 추정하는 방법을 제시하고자 한다.

II. 본 론

2-1 시스템 모델

그림 1은 비등간격 선형배치 MIMO 레이다와 그 신호를 탐지하는 한 개의 전파탐지 센서 E를 표시한다. MIMO 레이다는 N개의 서브 안테나로 이루어져 있으며, n번째 안테나의 거리가 l_n 으로 배치되어 있다($l_1 = 0$). 각 서브 안테나는 무지향성 안테나로써 n번째 서브 안테나는 파형신호 $s_n(t)$ 를 송신한다.

서로 다른 서브 안테나의 파형신호는 다음과 같은 직교관계를 만족한다.

$$\int_T s_n(t)s_m^*(t)dt = \delta(n-m), n, m = 1, \dots, N \quad (1)$$

여기서 $\delta(\cdot)$ 는 크로네커 델타 함수이다.

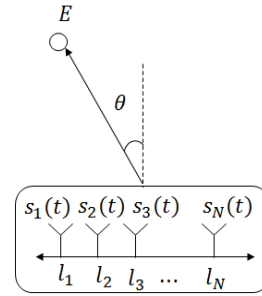


그림 1. MIMO 레이다와 전자탐지 센서 시스템도
Fig. 1. System diagram for MMO radar and electronic warfare sensors.

MIMO 레이다와 전파탐지 센서 간의 거리가 멀 경우, 각 서브 안테나에서 센서에 입사되는 신호를 평면파로 근사할 수 있는 원거리(far field) 가정과 신호의 대역폭이 작은 협대역(narrowband) 가정하에 MIMO 안테나에서 바라본 센서 E의 각도를 θ 라 하면, 센서 E에 수신된 MIMO 레이다 신호 $r(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) e^{j2\pi \frac{l_n}{\lambda} \sin \theta} \quad (2)$$

여기서 전송 주파수의 역수 관계인 파장 길이 λ 는 전파탐지 센서에서 주파수를 추정함으로써 알 수 있고, 각도 θ 는 전파탐지 센서의 위치를 변경함으로써 조절 가능한 변수이다. 또한, AGC(Auto Gain Controller)를 통하여 신호의 이득(gain)은 고정되었다고 가정한다. 식 (2)는 신호 벡터와 기존 위상배열 안테나의 조향벡터를 사용하여 다음과 같이 내적으로 표현될 수 있다.

$$r(t) = \vec{a}^T(\theta) \vec{s}(t) \quad (3)$$

여기서 조향 벡터는 아래와 같이 정의된다.

$$\vec{a}(\theta) = \left[e^{j2\pi \frac{l_1}{\lambda} \sin(\theta)}, e^{j2\pi \frac{l_2}{\lambda} \sin(\theta)}, \dots, e^{j2\pi \frac{l_N}{\lambda} \sin(\theta)} \right]^T \quad (4)$$

또한, 직교신호벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T \quad (5)$$

전파탐지 센서의 신호 $r(t)$ 로부터 길이 N의 직교신호

벡터 $\vec{s}(t)$ 를 추출하는 것은 불가능한 일이다. 성공적인 직교신호 분리를 위해서는 적어도 N 보다 많은 센서를 필요로 한다.

직교신호의 개수 N 은 2~3개의 센서만으로 추정 가능하며^[10], 이 방법을 통하여 N 개의 센서 E_1, \dots, E_N 가 각각 $\theta_1, \dots, \theta_N$ 각도로 배치되었다고 할 때, N 개의 수신신호 벡터 $\vec{r}(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t)]^T$ 에 대해서 각 신호의 이득이 AGC를 통해 정규화되었다고 가정하면 다음과 같은 행렬식을 얻는다.

$$\vec{r}(t) = A\vec{s}(t) \quad (6)$$

여기서 행렬 A 는 조향벡터로 구성된 행렬로 $A = [\vec{a}(\theta_1), \dots, \vec{a}(\theta_N)]^T$ 이며, ij 성분은 다음과 같이 주어진다.

$$A_{ij} = e^{j2\pi \frac{l_j}{\lambda} \sin \theta_i} \quad (7)$$

조향벡터의 선형독립 성질에 의하여 각도 $\theta_1, \dots, \theta_N$ 가 각기 다르다면 A 는 역행렬이 존재하고, A_{ij} 를 추정하여 다음과 같이 직교신호를 추출할 수 있다.

$$\vec{s}(t) = A^{-1}\vec{r}(t) \quad (8)$$

이렇게 추정된 직교신호를 활용하면 MIMO 레이더 신호의 특성을 이해하고, 나아가 상대의 MIMO 레이더를 무력화 및 기만할 수 있게 된다. 신호벡터 $\vec{r}(t)$ 로부터 A 를 추정하고 $\vec{s}(t)$ 를 추정하는 것은 암맹신호원분리(blind source separation)로, 일반적인 경우 Constant modulus algorithm(CMA)에 기반을 둔 복잡도가 높은 Algebraic CMA (ACMA)^[8]를 이용할 수 있으나, 본 논문에서는 탐지 센서의 위치를 조정할 수 있다는 가정하에 ESPRIT 알고리즘에 기반을 둔 복잡도 낮은 직교신호 추출 방법을 제안하고자 한다.

2-2 Non-ULA를 위한 ESPRIT 기반 직교파형 추정 알고리즘

등간격 배열의 경우 안테나의 간격이 다음과 같은 선형관계

$$l_n = (n-1)d \quad (9)$$

의 관계가 있어 다음 관계

$$A_{i,j+k} = e^{j2\pi \frac{(j+k-1)d}{\lambda} \sin \theta_i} = \left(e^{j2\pi \frac{(j-1)d}{\lambda} \sin \theta_i} \right)^k = (A_{ij})^k \quad (10)$$

를 만족하기 때문에 Vandermonde 구조를 갖게 된다. 이는 rotational invariance 성질과는 달라 전파탐지 센서들의 위치가 특별하지 않은 한 ESPRIT 알고리즘을 적용할 수 없다.

한편, MIMO 레이더의 신호를 탐지하는 경우, 직교신호 추출을 위한 최적의 센서 배치방법이 존재하는데^[11], 센서를 적절한 정수 M 과 간격 각도 ϕ 에 대하여 다음과 같이 배치한다고 하면

$$\theta_n = \sin^{-1}((n-M)\phi), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

조향벡터는 다음과 같이 주어지고

$$\vec{a}(\theta_n) = \left[e^{j2\pi \frac{l_1}{\lambda} (1-M)\phi}, \dots, e^{j2\pi \frac{l_n}{\lambda} (N-M)\phi} \right]^T \quad (12)$$

A 행렬의 값은 다음과 같이 주어져서

$$A_{ij} = e^{j2\pi \frac{l_j}{\lambda} (i-M)\phi} \quad (13)$$

이번에는 다음을 만족하는 rotational invariant 구조를 갖게 된다.

$$A_{i+k,j} = e^{j2\pi \frac{l_j}{\lambda} (i+k-M)\phi} = \left(e^{j2\pi \frac{l_j}{\lambda} (i-M)\phi} \right)^k = (A_{ij})^k \quad (14)$$

따라서 다음과 같이 대각행렬 L 을 정의하고

$$L = \begin{bmatrix} e^{j2\pi \frac{l_1}{\lambda}} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & e^{j2\pi \frac{l_N}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

선택행렬을 다음처럼 정의하면

$$J_1 := [I_{N-1}, 0_1], \quad J_2 := [0_1, I_{N-1}] \quad (16)$$

$$J_2 A = J_1 A L \quad (17)$$

의 관계를 얻게 된다. 행렬 R 을 N 개의 신호수집 센서로부터

터 수집된 $\vec{r}(t)$ 신호를 T_s 의 시간간격으로 샘플링된 N_s 개의 샘플로 구성된 센서 신호행렬로 다음과 같이 정의한다.

$$R = [\vec{r}(t_0), \vec{r}(t_0 + T_s), \dots, \vec{r}(t_0 + (N_s - 1)T_s)] \quad (18)$$

R 의 singular value decomposition(SVD), $R = UAV$ 를 계산하여

$$U_1 = J_1 U, \quad U_2 = J_2 U \quad (19)$$

로 정의하면 ESPRIT 알고리즘^[7]에 의하여 $U_1^\dagger U_2$ 의 eigenvalues들은 안테나 간격의 정보를 포함하는 행렬 L 이 된다(U^\dagger 는 U 의 left inversion을 표시한다). 따라서 $U_1^\dagger U_2$ 의 eigenvector들로 이루어진 행렬을 T 로 정의하면

$$U_1^\dagger U_2 = T^{-1} L T \quad (20)$$

가 성립한다. 따라서 센서 신호행렬 $R = AS$ 를 만드는 직교신호 행렬 $S = [\vec{s}(t_0), \dots, \vec{s}(t_0 + (N_s - 1)T_s)]$ 는 ESPRIT 알고리즘^[7]에 의해

$$S = T U^H R \quad (21)$$

로 A 의 직접적인 추정 없이도 주어진다. 따라서 센서배치가 식 (12)를 따르게 되면 ESPRIT 알고리즘으로 비등간격 선형배열 MIMO 레이더에 관해서도 안테나 간격은 물론 직교신호를 추출할 수 있음을 확인할 수 있다. 표 1은 식 (11)과 같은 안테나 배치를 활용하여 ESPRIT 알고리즘을 사용하는 경우와 기존의 ACMA^[8] 알고리즘의 방법을 비교한다. ESPRIT 알고리즘은 각각 한 번의 SVD와 Eigenvalue Decomposite을 사용함에 반해 ACMA는 2번의 SVD와 1번의 QR factorization과 joint diagonalization를 사용함에 따라 훨씬 높은 복잡도를 가짐을 알 수 있다.

III. 실험

본 실험에서는 Hadamard 직교신호를 송출하는 8개의 서브 어레이를 가진 비등간격 선형 MIMO 안테나를 고려한다($N=8$). 안테나 간격은 minimum redundancy linear array(MRLA)^[12]를 따른다. MRLA는 안테나 간격의 redundancy를 최소화함으로써 안테나의 개수를 줄이는 배열로

표 1. ESPRIT 알고리즘과 ACMA 알고리즘
Table 1. Comparison of ESPRIT and ACMA.

Given data $R(=AS)$	
ESPRIT	1. SVD: $R = UAV$ $U_1 = J_1 U, U_2 = J_2 U$ 2. Eigenvalue decomposite: $U_1^\dagger U_2 = T^{-1} L T$ 3. $S = T U^H R$
ACMA (Ref. [8])	1. Compute noise covariance matrix W 2. SVD: $W^{-1/2} R =: U \Sigma V^*$ Prewhitening: $\hat{R} = \Sigma^\dagger U^* W^{-1/2} R$ Construct P with rows vectorized $P_k = \text{vec}(\hat{R}_k \hat{R}_k^*)^T$ QR: $Q[1P] =: \begin{bmatrix} 1 & B^* \\ 0 & G \end{bmatrix}$ SVD of G , set $\{y_i\}$ to the smallest d right singular vectors 3. $Y_i = \text{mat}(y_i)$ ($i = 1, \dots, d$) Find T to jointly diagonalize $Y_i = T A_i T^*$ ($i = 1, \dots, d$) 4. $S = T^* \hat{R}$

정규화된 안테나 사이의 간격 $\left(\frac{2\pi}{\lambda} d\right)$ 이 특정한 패턴을 가지게 된다. 본 실험의 8개의 안테나에 대하여 사용하는 MRLA 패턴은 [1, 3, 6, 6, 2, 3, 2]를 고려한다^[12](그림 2).

MIMO 레이더의 위치를 원점(0, 0)이라 가정하고, 10개의 전파탐지기 센서의 배치는 표 2와 같이 배치한다(그림 3). 각 전파탐지기는 MIMO 레이더에서 10 km의 거리를

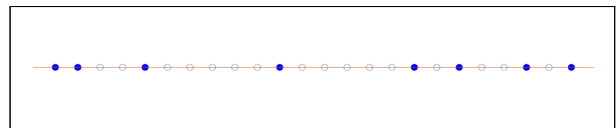


그림 2. MRLA 8 N-ULA 안테나 배열([1, 3, 6, 6, 2, 3, 2])
Fig. 2. MRLA 8 N-ULA pattern([1, 3, 6, 6, 2, 3, 2]).

표 2. 전파탐지기 센서 배열(km, degree)
Table 2. Sensor arrangement for ESPRIT(km, degree).

	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}
x	9.2	9.5	9.8	9.9	10	9.9	9.8	9.5	9.2	8.6
y	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
θ	-24	-17	-12	-6	0	6	12	17	24	30

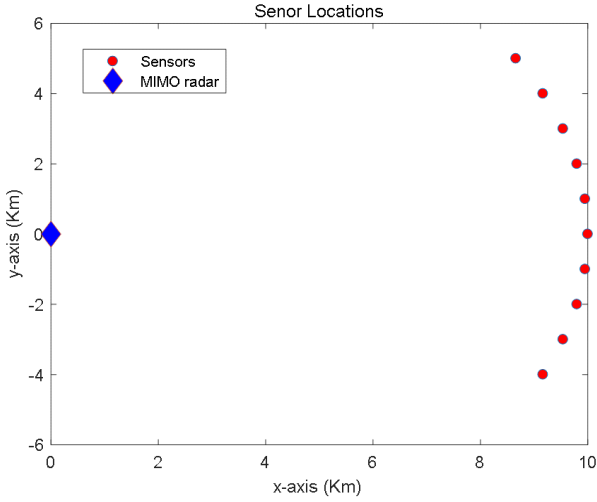


그림 3. 전파탐지 센서 배열 ($N=10$)
Fig. 3. Sensor arrangement for ESPRIT.

두고, 각도는 $\theta_n = \sin^{-1} \frac{(n-5)}{10}$ 이 되도록 배치되었다.

그림 4는 ESPRIT 알고리즘을 이용하여 30 dB 잡음 하에서 추정된 정규화된 안테나 간격 $\left(\frac{2\pi}{\lambda} l_i\right)$ 의 값을 나타낸다. 주어진 MRLA 패턴 [1, 3, 6, 6, 2, 3, 2] 에 대한 실제 간격은 {0, 1, 4, 10, 16, 18, 21, 23}인데, 추정결과 평균 에러값 $\left(\frac{1}{8} \sum_{n=1}^8 |\hat{d}_n - d_n|^2\right)$ 은 1.375×10^{-4} 에 해당하여 잡음의 영향을 감안하면 정확히 추정되었음을 알 수 있다.

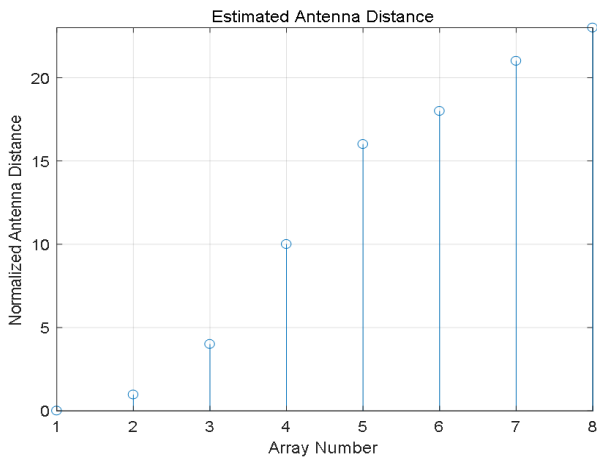


그림 4. ESPRIT을 이용하여 추정된 배열 간격
Fig. 4. ESPRIT estimation of array distance.

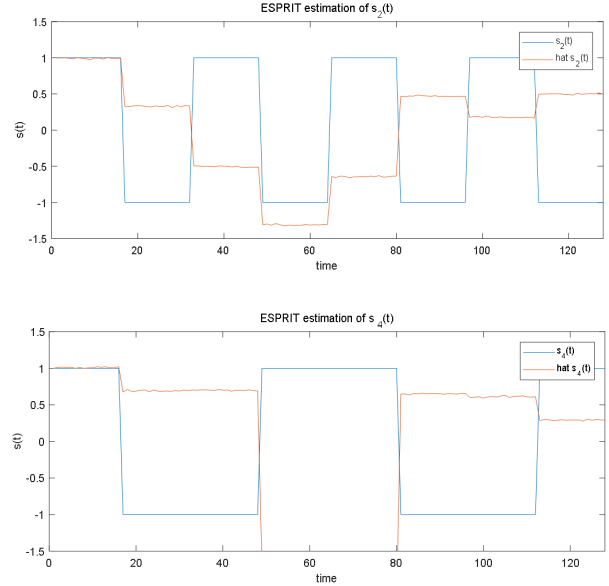


그림 5. ESPRIT을 이용하여 추정된 직교신호(센서 배열이 부적절할 경우)

Fig. 5. ESPRIT estimation of waveform(for non optimal sensor arrangement).

음의 영향을 감안하면 정확히 추정되었음을 알 수 있다.

그림 5는 30 dB SNR에서 전파탐지 센서 배열이 식 (11)을 따르지 않을 경우, 추출된 몇 개의 직교신호(2번과 4번)를 표시한다. 이 경우 $\theta_n = \frac{(n-5)}{10}$ 으로 선형적으로 배치되었는데, 본래의 Hadamard 직교신호를 추정하지 못함을 볼 수 있다.

그림 6은 30 dB SNR에서 식 (11)을 따르는 표 2에 제시된 센서 배치에 따라 ESPRIT으로 Hadamard 직교신호를 추정하는 결과를 제시한다. 잡음의 영향을 감안하면 완벽히 추정됨을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 새로운 개념의 차세대 레이더 기술인 MIMO 레이더에 대하여, 신호분석과 기만 등에 기초가 되는 중요한 파라미터인 직교신호를 비등간격 선형배열 MIMO 레이더에서 효율적으로 추정하기 위하여 안테나 배열 간격을 조정하여 ESPRIT 알고리즘을 적용하는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 사용하여 비등간격

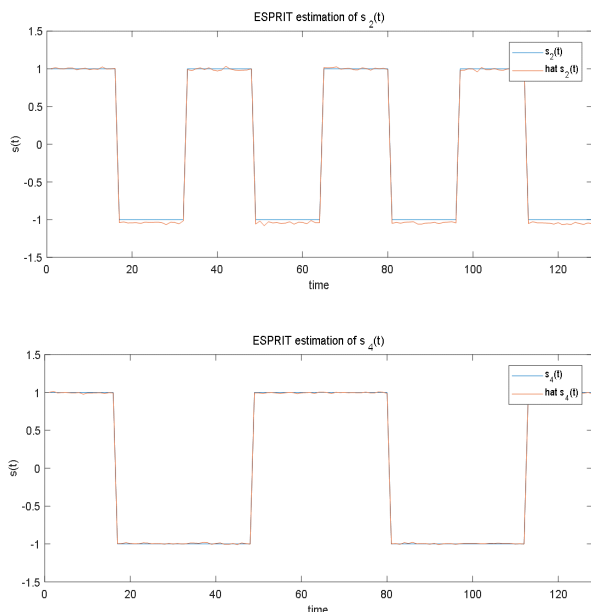


그림 6. ESPRIT을 이용한 비등간격 선형배열 MIMO 레이다 직교신호 추정

Fig. 6. ESPRIT estimation of waveforms for non-ULA MIMO radar.

선형 안테나 배열의 간격과 직교신호 추정성능을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

References

- [1] J. Li, P. Stoica, L. Xu, and W. Roberts, "On parameter identifiability of MIMO radar," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 968-971, Dec. 2007.
- [2] C. Y. Chen, P. P. Vaidyanathan, "Minimum redundancy MIMO radars," in *2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Seattle, WA, 2008, pp. 45-48.
- [3] B. Friedlander, "On the relationship between MIMO and SIMO radars," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, no. 1, pp. 394-398, Jan. 2009.
- [4] A. Dogandzic, A. Nehorai, "Cramer-Rao bounds for estimating range, velocity, and direction with an active array," *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 49, no. 6, pp. 1122-1137, Jun. 2001.
- [5] Y. Fei, Y. Fan, B. K. Lau, and J. S. Thompson, "Optimal single-port matching impedance for capacity maximization in compact MIMO arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 11, pp. 3566-3575, Nov. 2008.
- [6] G. R. Wiley, *ELINT, The Interception and Analysis of Radar Signals*, Artech House, Boston, 2006.
- [7] R. Roy, T. Kailath, "ESPRIT-Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques," *IEEE Transactions Acoustics, Speech, Signal Processing*, vol. 37, no. 7, pp. 984-995, Jul. 1989.
- [8] A. J. Van der Veen, "Algebraic methods for deterministic blind beamforming," in *Proceedings of IEEE*, Oct. 1998, vol. 86, no. 10, pp. 1987-2008.
- [9] J. F. Cardoso, "Blind signal separation: Statistical principles," in *Proceedings of the IEEE*, Oct. 1998, vol. 86, no. 10, pp. 2009-2025.
- [10] D. K. Lee, W. Chung, "Placement and deduction of the number of sensors for estimation orthogonal waveforms of MIMO radars," in *The 27th Joint Conference on Communications and Information*, Mar. 2017.
- [11] D. H. Kim, J. H. Lee, J. I. Song, and W. Chung, "Blind parameter estimation schemes for uniform linear array MIMO radars using distributed multiple electronic sensors," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 8, pp. 619-627, Aug. 2017.
- [12] A. Camps, A. Cardama, and D. Infantes, "Synthesis of large low-redundancy linear arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 12, pp. 1881-1883, 2002.

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/교수]



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