비동기식 레이더의 검출 성능 비교: MIMO 레이더, 위상 배열 레이더, 지향성 MIMO 레이더

정회원 안 찬 호*, 양 장 훈**, 박 의 영***, 류 영 재***, 한 덕 찬***, 종신회원 김 동 구*°

Detection Performance of Noncoherent Radar: MIMO Radar, Phased Array Radar, Directional MIMO Radar

Chan-ho An*, Janghoon Yang**, Ui Young Pak***, Young-Jae Ryu***,
Duk Chan Han*** *Regular Members,* Dong Ku Kim*° *Lifelong Member*

요 약

기존의 위상 배열 레이더는 인접한 안테나 단일 파형의 위상차를 이용하여 특정 방향으로 신호를 집중시키는 방식이다. 반면, MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 레이더는 다수 파형을 넓게 분포한 안테나를 통해 전송하는 방식이다. 이때, 다수의 파형과 넓게 분포한 안테나로부터 발생한 공간 다이버시티를 높은 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 영역에서는 위상 배열 레이더보다 우수한 타겟 검출 성능을 보인다. 하지만, 낮은 SNR 영역에서는 신호를 집중시켜 어레이 이득을 얻는 위상 배열 레이더가 더 좋은 성능을 나타낸다. 본 논문에서는 MIMO 레이더에 위상 배열 안테나를 결합하여 다이버시티 이득과 어레이 이득을 모두 얻을 수 있는 지향성 MIMO 레이더의 검출 성능을 비교해 본다. 이와 더불어 실제 시스템에서 발생할 수 있는 지향각 오차에 대한 민감도가 성능에 미치는 영향을 분석하여, RF 장비의 수가 제한적이고 타겟 검출 성능이 제한적인 상황에서 각 레이더 성능을 비교하였다.

Key Words : radar, detection, multiple-input multiple-output (MIMO), phased array

ABSTRACT

In a traditional phased array radar, closely spaced antenna elements transmit a scaled version of single waveform to maximize the signal energy. On the contrary, a multiple-input multiple-output (MIMO) radar consists of widely separated antennas and transmits an arbitrary waveform from each antenna element. These waveforms and spatial diversity enable superior capabilities compared with phased array radar. At high signal-to-noise ratio (SNR), the detection performance of the MIMO radar is better than the phased array radar due to the diversity gains. However, the phased array radar outperforms the MIMO radar at low SNR, due to the energy maximization. In this paper, we investigate the compromised scheme between the MIMO radar and the phased array radar. Employing the MIMO radar equipped with phased array elements, the compromised scheme achieves both array gain and diversity gain. Also, we compare the performance degradation when the steering direction is incorrect.

※ 본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음. (영상정보용 공용데이터링크의 주파수 공유 기술구조 및 성능분석)
* 연세대학교 전기전자공학과 이동통신연구실(chanhoa@yonsei.ac.kr, dkkim@yonsei.ac.kr), (° : 교신저자)
** 한독미디어대학원대학교 뉴미디어학부(jhyang@kgit.ac.kr)
*** 국방과학연구소 제2기술연구본부 3부(puy@add.re.kr, yjryu@add.re.kr, dchan@add.re.kr),
논문번호 : KICS2011-08-351, 접수일자 : 2011년 8월 15일, 최종논문접수일자 : 2011년 11월 28일

Ⅰ. 서 론

비교적 최근까지도 레이더 시스템은 신호를 집중시키고 최대화 시키는 방식에 주력했다. 따라서 인접한 안테나 배열에 상관도가 높은 신호를 전송/수신하는 위상 배열(Phased Array) 방식 또는 빔 형성(Beam forming) 방식[1]이 사용되었다. 이러한 일반적인 생각과는 달리, Fisheler[2],는 넓게 분포한 안테나로부터 생기는 다이버시티 이득을 주목하며 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 레이더의 개념을 제안하였다. MIMO 레이더의 기본원리는 넓게 분포한 각 안테나별로 다른 파형의 신호를 전송하고, 타겟으로부터 반사된 신호를 수신하는 방식이다. MIMO 통신에서와 마찬가지로, 다이버시티 이득으로부터 페이딩으로 인한 성능저하를 완화하며, 타겟 검출 능력을 향상 시킬 수 있다[4].

다이버시티 이득으로 인해 MIMO 레이더의 타겟 검출 성능은 높은 SNR(Sinal-to-Noise Ratio) 영역에서 기존의 위상 배열 레이더보다 우수하다. 반면 낮은 SNR 영역에서는 어레이 이득을 갖는 위상 배열 레이더가 우수한 성능을 나타낸다[3]. SNR은 타겟과 레이더 사이의 거리, 타겟으로부터의 반사파, 송신 전력 등 많은 요소에 의해 결정된다. 따라서, 실제 레이더 시스템에서는 항상 높은 SNR을 나타내지 못하며, 이는 MIMO 레이더로의 전환으로 항상 더 우수한 성능을 나타낸다고 보장할 수 없다.

또한 넓게 분포한 다수의 안테나로 MIMO 레이더 기지를 설립하기 위해서는 공간적인 제약도 따르게 된다. 본 논문에서는 MIMO 레이더에 위상 배열 소자를 결합하여, 다이버시티 이득과 어레이 이득을 모두 얻을 수 있는 지향성 MIMO 레이더의 검출 성능을 비교해 본다. 공정한 비교를 위해 지향성 MIMO 레이더의 전체 위상 배열 소자 수와 MIMO 레이더의 안테나 수를 동일하게 하여 비교, 분석하였다. 또한 지향성 MIMO 레이더의 경우, 타겟에 대한 지향 방향 오차가 성능에 미치는 영향을 비교, 분석하였다.

레이더 시스템에는 응답신호의 크기만으로 타겟의 존재 유무를 측정하는 비동기식(Noncoherent) 방식과 크기와 위상을 통해 타겟 검출 및 공간 해상도를 높이는 동기식(Coherent) 방식으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 MIMO 레이더와 지향성 MIMO 레이더의 감시구역내의 타겟 검출 성능을 비교하기 위해 비동기식 방식을 가정하였으며, 다음과 같이 구성되었다. Ⅱ장에서는 레이더 시스템의 신호 모델(Signal Model)과 검출 이론(Detection Theory)을 살펴보고, Ⅲ장에서는 각 레이더 시스템의 신호 모델과 타겟 검출 방식을 설명한다. Ⅳ장에서는 각 레디어 시스템의 성능을 평가하고, 최종적으로 Ⅴ장에서 연구 결과를 정리한다.

Ⅱ. 레이더 신호 모델 및 검출 이론

2.1 신호 모델 (Signal Model)

송신 안테나 수가 n_T개이고, 수신 안테나 수가 n_R인 MIMO 레이더 시스템에서 송신 신호벡터를 $\boldsymbol{s}(t)=[s_1(t),...,s_{n_T}(t)]^T$라고 하면, 수신 신호벡터 $\boldsymbol{r}(t)$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{r}(t)=\sqrt{\frac{E_s}{n_T}}\,diag(\boldsymbol{a}(\theta))\boldsymbol{H}diag(\boldsymbol{b}(\phi))\boldsymbol{s}(t-\tau)+\boldsymbol{n}(t), \quad (1)$$

여기서 $\boldsymbol{a}(\theta)=[1,e^{j\theta_2},...,e^{j\theta_{n_R}}]^T$ 는 수신 조향벡터를 나타내며, $\boldsymbol{b}(\phi)=[1,e^{j\phi_2},...,e^{j\phi_{n_T}}]^T$ 는 타겟과의 송신 조향벡터를 나타낸다. 또한 $diag(\boldsymbol{d})$는 $\boldsymbol{d}$ 성분으로 구성된 대각 행렬(diagonal matrix)을 나타낸다. $\boldsymbol{H}$는 $n_R\times n_T$ 채널 행렬이고, $\boldsymbol{n}(t)$는 복소 가산성 백색 가우시안 잡음으로 평균이 0이고, 분산은 σ_n^2을 가지고, $E_s=E[\boldsymbol{s}(t)^H\boldsymbol{s}(t)]$ 는 송신 신호전력을 나타낸다. 본 논문에서 $(\bullet)^T$와 $(\bullet)^H$ 는 전치(Transpose)와 복소 공액 전치(Hermitian Transpose)를 나타내는 기호로 사용한다.

2.2 검출 이론 (Detection Theory)

레이더가 타겟을 검출할 때, 2가지의 오류가 나올 수 있다. 하나는 타겟이 있는데도 없다고 판단하는 경우의 수이고, 이를 "Miss Detection 확률(P_{MD})"이라 한다. 다른 하나는 타겟이 없음에도 있다고 판단하는 경우로 "False Alarm 확률(P_{FA})"이라 한다.

False Alarm 확률을 줄이는 동시에 Detection 확률($P_D=1-P_{MD}$)을 최대화하는 것은 불가능하다. 따라서 정해진 False Alarm 확률을 만족하며 Detection 확률을 최대화 하는 Neyman-Pearson 검출 기준(Criterion)을 사용할 수 있다[5].

$$T=\log\frac{f(r(t)|1)}{f(r(t)|0)}\underset{0}{\overset{1}{\gtrless}}\lambda_{Th} \quad (2)$$

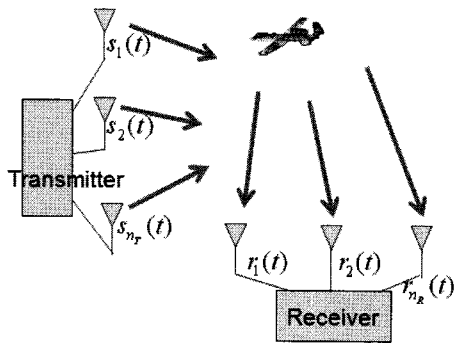
수식 (2)는 Neyman-Pearson 검출 기준을 나타내며, 여기서 $f(r(t)|0)$와 $f(r(t)|1)$ 는 신호가 없을 때와 있을 때의 확률 밀도 함수(Probability Density Function)을 나타내고, λ_{Th}는 정해진 False Alarm을 만족하는 검출 기준 값(Threshold)이다.

Ⅲ. 타겟 검출 기준 (Detection Criterion)

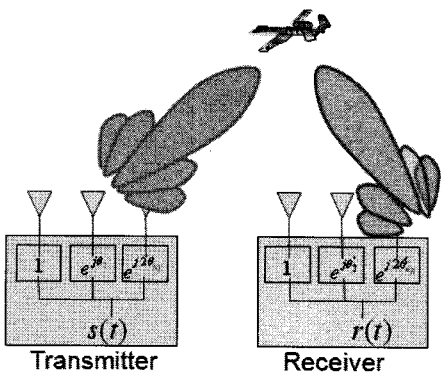
3.1 MIMO 레이더

MIMO 레이더는 그림 1 (a)에 나타낸 바와 같이 안테나 간의 타겟 반응(Target Response)에 상관성이 없게 하기 위하여 타겟과의 거리(R), 타겟의 크기(D), 주파수 파장(λ)을 고려하여 안테나 간의 거리 ($d_{ant} \geq \lambda R/D$)를 넓게 분포한다. MIMO 통신에서와 같이, 수식 (1)의 채널 행렬 $\boldsymbol{H}$의 각 원소는 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수(Random Variable)로 나타낼 수 있다. 따라서 수식 (1)은 수식 (3)과 같이 변형된다[3].

$$\boldsymbol{r}(t) = \sqrt{\frac{E_s}{n_T}}\,\boldsymbol{H}\boldsymbol{s}(t-\tau) + \boldsymbol{n}(t), \tag{3}$$



(a) MIMO 레이더 시스템



(b) 위상 배열 레이더 시스템

그림 1. MIMO 레이더 시스템과 위상 배열 레이더 시스템

수식 (1)의 $diag(\boldsymbol{a}(\theta))\boldsymbol{H}diag(\boldsymbol{b}(\phi))$와 $\boldsymbol{H}$는 같은 확률 분포를 갖는다. 또한 송신기는 n_T개의 안테나를 통해 신호를 전송한다. 이때, 각 안테나별로 직교 파형(Orthogonal Waveform)을 전송하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{w}_i = [s_i(1),...,s_i(n_T)]^T, \text{ for } i = 1,...,n_T \tag{4}$$

여기서 수식 (3)은 $i \neq k$ 일 때, $\boldsymbol{w}_i^H \boldsymbol{w}_k = 0$이고, $i = k$ 일 때, $\boldsymbol{w}_i^H \boldsymbol{w}_k = 1/n_T$를 만족한다. 이때의 검출 기준은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \| \boldsymbol{z} \|^2 \underset{0}{\overset{1}{\lessgtr}} \lambda_{Th} \tag{5}$$

여기서 $n_R n_T \times 1$ 벡터 $\boldsymbol{z}$는 정합 필터(Mached Filter)의 출력으로 $[z]_{i,n_R+k} \doteq \int r_i(t)s_k(t-\tau)dt$ 로 각 원소를 나타낼 수 있다.

3.2 위상 배열(Phased Array) 레이더

위상 배열 레이더는 그림 1 (b)에 나타낸 바와 같이 안테나 배열 소자를 인접하게 배치하여 $\hat{\phi}$ 방향으로 조향하여, 빔 형성 신호 $\boldsymbol{s}(t) = \boldsymbol{b}(\hat{\phi})s(t)$ 를 전송한다. 따라서 수식 (1)은 다음과 수식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{r}(t) = \sqrt{\frac{E_s}{n_T}}\,\alpha \boldsymbol{a}(\theta)\boldsymbol{b}(\phi)\boldsymbol{b}(\hat{\phi})s(t-\tau) + \boldsymbol{n}(t), \tag{6}$$

여기서 α는 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수이다. 수신기에서는 $\hat{\theta}$방향으로 빔을 형성한다. 이때, $\hat{\theta} = \theta$이면 (즉, $\boldsymbol{a}(\hat{\theta})^H \boldsymbol{a}(\theta) = n_R$) n_R 만큼의 어레이 이득이 생기게 된다.

마찬가지로 송신기에서도 $\hat{\phi} = \phi$이면 n_T 만큼의 이득 (즉, $\boldsymbol{b}(\hat{\phi})^H \boldsymbol{b}(\phi) = n_T$) 을 얻을 수 있다. 따라서 수식 (6)은 수식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{r}(t) &= \boldsymbol{a}(\hat{\theta})\boldsymbol{r}(t) \\ &= \sqrt{\frac{E_s}{n_T}}\,\alpha n_R n_T s(t-\tau) + n(t), \end{aligned} \tag{7}$$

이때의 검출 기준은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T=|z|^2 \underset{>}{\overset{<}{}}_{0}^{1} \lambda_{Th} \tag{8}$$

여기서 $z \doteq \int r^H(t)a(\hat{\theta})s(t-\tau)dt$ 는 정합 필터의 출력이다. (또는 $z \doteq \int r(t)s(t-\tau)dt$)

3.3 지향성(Directional) MIMO 레이더

앞의 두 소단원에서는 MIMO 레이더와 위상 배열 레이더의 신호 모델을 살펴보았다. 본 소단원에서는 위상 배열 소자를 결합하여 어레이 이득을 얻을 수 있는 MIMO 레이더의 신호모델과 타겟 검출 기준을 살펴본다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 지향성 MIMO 레이더는 L_T개의 위상 배열 소자로 빔형성을 하며, 넓게 분포한 n_T개의 개별 빔은 개별적인 직교 파형을 전송하게 된다. 마찬가지로 수신단에서는 L_R개의 위상 배열 소자를 이용하여 n_R개의 빔으로 수신하게 된다. 앞의 소단원에서 전송 빔형성 이득의 결과를 활용하여 타겟의 위치와 송신 안테나 빔이 일치하는 경우 (즉, $\phi_i=\hat{\phi}_i$), i번째 수신 안테나 빔을 형성하는 위상 배열 소자들이 수신하는 신호는 수식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i(t)=L_T\sqrt{\frac{E_s}{n_TL_T}}\,a(\theta_i)\alpha^H s(t-\tau)+n(t), \tag{9}$$

여기서 $n_T\times 1$ 채널 벡터 α는 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수들로 구성되어 있다. i번째 수신 안테나 빔을 형성하는 L_R개의 위상 배열 소자들을 통해 수신 빔형성을 하면, 어레이 이득을 얻을 수 있다. 타겟의 위치와 수신 빔의 방향이 일치하는 경우 (즉, $\theta_i=\hat{\theta}_i$), 수식 (9)는 수식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_i(t) &= a(\hat{\theta}_i)\boldsymbol{r}_i(t) \\ &= L_RL_T\sqrt{\frac{E_s}{n_TL_T}}\,\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{s}(t-\tau)+n(t), \end{aligned} \tag{10}$$

이때의 검출 기준은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T=\|\boldsymbol{z}\|^2 \underset{>}{\overset{<}{}}_{0}^{1} \lambda_{Th} \tag{11}$$

여기서 $n_Rn_T\times 1$ 벡터 $\boldsymbol{z}$는 정합 필터(Mached Filter)의 출력으로 $[z]_{i,n_R+k} \doteq \int r_i(t)s_k(t-\tau)dt$ 로 각 원소를 나타낼 수 있다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과 및 성능 비교

본 장에서는 MIMO, 위상 배열, 지향성 MIMO 레이더의 타겟 검출 성능을 비교, 분석한다. MIMO레이더와 위상 배열 레이더에서는 8개의 송신 안테나 ($n_T=8$)와 8개의 수신 안테나($n_R=8$)를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

공정한 비교를 위하여 지향성 MIMO 레이더에서는 전체 위상 배열 소자의 수가 8개가 되도록 설정하였다. (즉, $n_TL_T=8, n_RL_R=8$)

그림 3은 False Alarm 확률을 $P_{FA}=10^{-6}$일 때, Miss Detection 확률(P_{MD})을 나타내었다. 다이버시티 이득으로 생기는 SNR에 따른 Miss Detection 확률의 감소율(기울기)은 MIMO 레이더, 4×4 지향성 MIMO($n_T\times n_R$ D-MIMO), 2×4 D-MIMO, 4×2 D-MIMO, 2×2 D-MIMO, 위상 배열 레이더 순으로 나타났다. 이는 수신 안테나 수(n_R)에 비례하여 다이버시티 이득(기울기)이 생기는 MIMO 통신의 결과와 유사하게 나타난다.

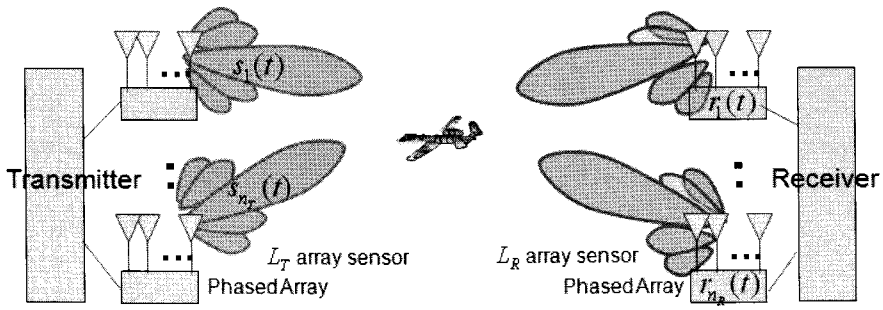


그림 2. 지향성 MIMO 레이더 시스템

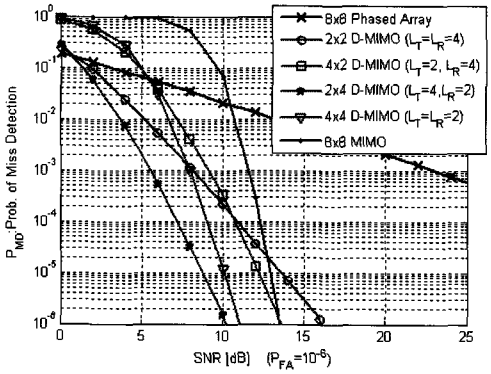


그림 3. SNR에 따른 위상 배열(Phased Array) 레이더, MIMO 레이더, 지향성 MIMO($n_T \times n_R$ D-MIMO) 레이더의 Miss Detection 확률

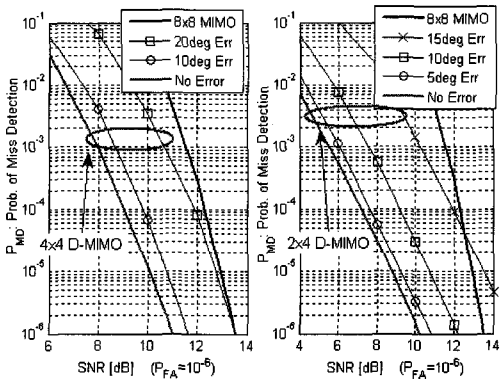


그림 4. 지향방향 오차가 있을 때, 4×4 지향성 MIMO 레이더(좌)와 2×4 지향성 MIMO($n_T \times n_R$ D-MIMO) 레이더(우)의 Miss Detection 확률

하지만 Miss Detection 확률$P_{MD} = 10^{-4} \sim 10^{-6}$를 만족시키기 위해서 요구되는 SNR은 2×4 D-MIMO와 4×4 D-MIMO가 가장 낮은 것으로 나타났다. 즉, 낮은 SNR에서는 다이버시티 이득보다 어레이 이득이 우세하게 나타난다. 따라서 레이더 시스템에서 요구하는 P_{MD}와 SNR의 동작 영역에 따라서 타겟 검출 성능이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 지향성 MIMO(D-MIMO) 레이더의 경우, 각 안테나의 빔이 타겟의 위치로 정확히 일치해야 최대 어레이 이득을 얻을 수 있다. 따라서 송수신 빔 형성 과정에서 타겟의 위치를 정확히 지향하지 않는다면 성능 저하가 발생하게 된다.

그림 4는 2×4 D-MIMO와 4×4 D-MIMO의 지향각 오차가 있을 경우의 성능을 나타내었다. 여기서 송신 지향각 오차와 수신 지향각 오차는 동일하고, 소자간의 거리는 주파수의 반 파장으로 가정하였다. SNR 손실이 발생하여 지향각 오차가 커질수록 Miss Detection 확률이 커지는 것을 알 수 있다. 시스템에서 요구하는 Miss Detection 확률이 $P_{MD} = 10^{-6}$인 경우, 4×4 D-MIMO의 경우 약 20 Deg의 지향각오차까지 8×8 MIMO 레이더 성능과 유사한 것을 볼 수 있다. 또한 2×4 D-MIMO의 경우에는 약 10~15 Deg의 지향각 오차까지 8×8 MIMO 레이더 성능과 견줄 수 있는 것을 알 수 있다.

이는 빔형성을 하는 위상 배열 소자의 수 (L_T와 L_R)에 따라서 지향 방향으로의 빔 패턴이 달라지는데, 소자의 수가 많아질수록 더 많은 어레이 이득이 생기면서 지향각 오차에 민감해지기 때문이다.

따라서 더 많은 송신 위상 배열 소자를 사용한 2×4 D-MIMO가 4×4 D-MIMO와 비교하여 지향각 오차에 더 민감한 성능을 나타낸 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 MIMO 레이더에 위상 배열 안테나를 결합하여 다이버시티 이득과 어레이 이득을 모두 얻을 수 있는 지향성 MIMO 레이더의 검출 성능을 비교해 보았다. 다이버시티 이득으로 생기는 Miss Detection 확률의 감소율(기울기)은 MIMO 레이더가 더 크게 나타났지만, Miss Detection 확률의 특정 동작 영역($P_{MD} = 10^{-4} \sim 10^{-6}$)에서는 지향성 MIMO 레이더의 성능이 더 좋은 것으로 나타났다.

또한 타겟과의 지향각 오차가 발생하였을 때의 지향성 MIMO 레이더의 성능도 비교분석 하였는데, 일정 오차 범위 안에서 MIMO 레이더보다 더 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 본 논문의 결과를 토대로 요구되는 P_{MD}와 SNR의 동작 영역에 따라서 레이더 시스템을 설계하고 배치하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] S. Haykin, J. Litva, and T. J. Shepherd, *Rdar Array Processing*, New York, 1st edition, 1993

[2] E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, L. Cimini, D. Chizhik, and R. Valenzuela, "MIMO radar: An idea whose time has come," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Radar*, pp. 71-78, Apr. 2004

[3] E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, L. Cimini,

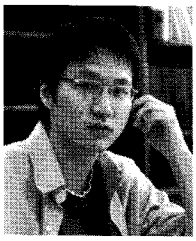
D. Chizhik, and R. Valenzuela, "Spatial Diversity in Rdars-Models and Detection Performance," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 54, no. 3, pp. 823 -838, Mar. 2006

[4] J. Li and P. Stoica, *MIMO Radar Signal Processing*, 1st ed. New York: Wiley, 2009

[5] J. L. Melsa and D. L. Cohn, *Decision and Estimation Theory*. New York: McGraw- Hill, 1978.

[6] 임종태, 유도식, "균일한 선형 배열의 다중 입출력 레이더 시스템을 위한 압축 센싱," *한국항행학회논문지*, 14권 1호, pp.80~86, 2월, 2010.

안 찬 호 (Chan-ho An) 정회원

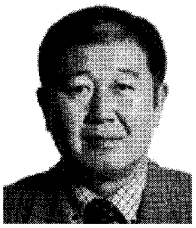


2006년 2월 경희대학교 전자정보학부 공학사
2008년 2월 연세대학교 전기전자공학과 공학석사
2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
<관심분야> 통신신호처리기술, MIMO 송·수신 기법, OFDMA/SC-FDMA, Lattice Reduction, MIMO Radar, 이동체 추적알고리즘

양 장 훈 (Janghoon Yang) 정회원

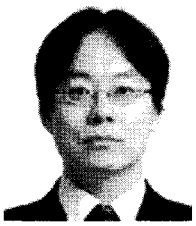
1996년 2월 연세대학교 전파공학과 공학사
2001년 U.S.C. Dept of Electrical Engineering 공학석사
2001년 U.S.C. Dept of Electrical Engineering 공학박사
2001년~2006년 삼성전자 책임연구원
2006년~2010년 연세대학교 공과대학 전기전자공학부 연구 교수
2010년~현재 한독미디어대학원대학교 뉴미디어학부 조교수
<관심분야> CDMA, OFDMA, MIMO, Relay, Cross layer optimization, 간섭 채널, 정보이론, neural signal processing

박 의 영 (Ui Young Pak) 정회원



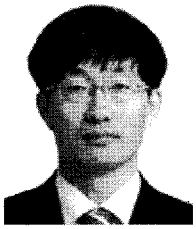
2003년 3월 연세대학교 전기전자공학과 공학박사
2011년 현재 국방과학연구소
<관심분야> 이동/통신, 데이터 링크

류 영 재 (Young-Jae Ryu) 정회원



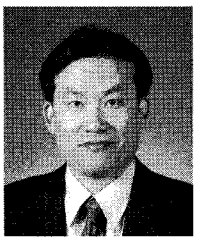
2000년 2월 경북대학교 전자전기공학부 공학사
2002년 2월 경북대학교 전자공학과 석사 공학석사
2002년~현재 국방과학연구소
<관심분야> 대역확산통신, 디지털 신호처리

한 덕 찬 (Duk Chan Han) 정회원



1989년 2월 충남대학교 전자공학과 공학사
1991년 2월 충남대학교 전자공학과 공학석사
1991년~현재 국방과학연구소
<관심분야> 데이터 링크, 무선 네트워크

김 동 구 (Dong Ku Kim) 종신회원



1983년 2월 한국항공대학교 통신공학과 졸업
1985년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 석사
1992년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 박사
1994년~현재 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 교수
<관심분야> 4세대 이동통신 시스템, 협력 MIMO 기술, 무선 이동 Relay 기술, Compressed Sensing, 차세대 에너지 효율 무선 시스템 기술