

논문 2011-48SP-5-12

공분산 역행렬 원소 제거 기법을 이용한 Capon 알고리즘의 성능 개선

(Improving the Performance of the Capon Algorithm by Nulling
Elements of an Inverse Covariance Matrix)

김 성 민*, 강 동 훈*, 이 용 욱*, 나 선 필***, 오 왕 록**

(Seongmin Kim, Donghoon Kang, Yongwook Lee, Sunphil Nah, and Wangrok Oh)

요 약

Capon 알고리즘은 지향방향에 대하여 일정한 이득을 유지하면서 배열의 출력을 최소화 시키므로 FM (Fourier method) 알고리즘에 비하여 우수한 분해능 (resolution)을 제공한다. 그러나 Capon 알고리즘의 DoA (Direction of Arrival) 추정 성능은 입사 신호의 SNR (signal-to-noise ratio)이 낮은 경우 급격히 저하되는 문제가 있어 신호원들의 입사각이 유사한 경우 각각의 신호원을 구분하지 못하는 문제가 있다. 본 논문에서는 Capon 알고리즘에서 사용되는 공분산 역행렬의 원소를 제거하는 기법을 이용하여 수신 신호의 SNR이 낮은 환경에서 보다 나은 분해능을 제공하는 개선 방안을 제안한다.

Abstract

It is well known that the Capon algorithm offers better resolution compared to that of the FM (Fourier method) algorithm by minimizing the total output power while maintaining a constant gain in the look direction. Unfortunately, the DoA (Direction of Arrival) estimation performance of the Capon algorithm is drastically degraded when the SNR of received signal is low and thus, it cannot distinguish among signal sources which have similar incidence angles. In this paper, we propose a novel scheme enhancing the resolution of the Capon algorithm by nulling all rows except the first row of an inverse covariance matrix.

Keywords : Capon, Beamforming, Resolution, Inverse covariance matrix.

I. 서 론

배열 안테나를 이용한 입사 신호의 DoA (Direction of Arrival) 추정은 전파 관리 및 이동 통신 분야 등에서 광범위하게 연구되어왔다. 전파 관리 분야에서는 신호원의 입사 방향을 추정하여 신호원의 공간적인 위치를 결정하는데 사용되며 이동 통신 분야에서는 빔형성

(beamforming) 알고리즘을 적용한 스마트 안테나를 이용하여 이동 통신 용량을 증대시키는데 사용되고 있다^[1~2]. 배열 안테나와 배열 신호처리 기술을 이용한 입사 신호의 DoA 추정 방식 중 최초의 시도는 빔형성 알고리즘의 적용이었다. 이에 해당하는 알고리즘으로 FM (Fourier method) 빔형성 알고리즘^[1, 3], Capon 빔형성 알고리즘^[4] 등이 있다. FM 빔형성 알고리즘은 Fourier 변환을 기본으로 하는 스펙트럼 분석 기법을 배열 안테나에 적용한 것으로 단순히 특정 방향으로 입사하는 신호에 대해 큰 가중치를 주는 반면 Capon 빔형성 알고리즘은 특정 방향으로 입사하는 신호의 이득을 일정하게 유지하면서 동시에 간섭 신호 또는 잡음에 대해서는

* 학생회원, ** 정회원-교신저자, 충남대학교
(Department of Electronics and Computer
Engineering, Chungnam National University)

*** 정회원, 국방과학연구소
(ADD)

접수일자: 2011년7월8일, 수정완료일: 2011년8월11일

상대적으로 적은 가중치를 주어 배열 안테나 시스템의 출력 SNR (signal-to-noise ratio)을 극대화할 수 있는 기법이다. 그러나 Capon 알고리즘의 DoA 추정 성능은 입사 신호의 SNR이 낮은 경우 급격히 저하되는 문제가 있어 신호원들의 입사각이 유사한 경우 각각의 신호원을 구분하지 못한다. 본 논문에서는 Capon 알고리즘에서 사용되는 공분산 역행렬의 원소를 제거하는 기법을 이용하여 수신 신호의 SNR이 낮은 환경에서 보다 나은 분해능을 제공하는 개선 방안을 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델 제시 및 기존의 알고리즘과 제안하는 알고리즘을 분석하고, III장에서 제안하는 알고리즘의 성능을 비교 및 분석하며, IV장에서 결론을 맺는다.

II. 본 론

1. 시스템 모델

DoA 추정을 위한 시스템 모델은 그림 1과 같다.

본 논문에서는 배열 간의 간격이 d 이고 배열의 수가 N 인 ULA (uniform linear array)를 고려하였으며 이에 따라 가중치 (weights) 벡터 \mathbf{W} 는 조향 (steering) 벡터로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[1].

$$\mathbf{W} = \frac{1}{N} [1 \ e^{j\gamma \cos \theta} \ \dots \ e^{j\gamma(N-1)\cos \theta}]^T \quad (1)$$

여기에서 $\gamma = 2\pi fd/c$ 이며 f 는 구동 주파수, c 는 빛의 전파 속도 (propagation speed)를 각각 나타내며, θ 는 배열 안테나의 조향 각을 나타낸다. 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 배열의 출력 $y(k)$ 는 가중치 벡터와 각 배열에 입사하는 신호 벡터의 곱의 합으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(k) = \sum_{n=1}^N w_n^* x_n(k) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(k) \quad (2)$$

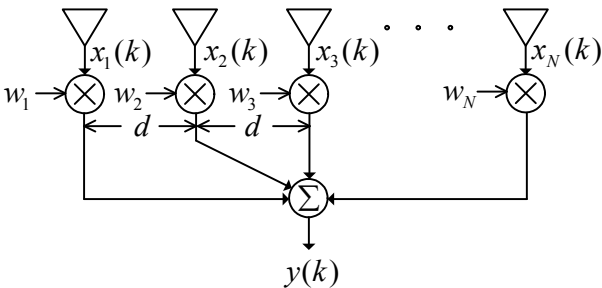


그림 1. 빔형성기의 구조
Fig. 1. Beamformer structure.

여기에서 w_n^* 는 w_n 의 공액 복소수 (complex conjugate)를, \mathbf{W}^H 는 \mathbf{W} 의 hermitian transpose를 나타내며 입사 신호 벡터 $\mathbf{X}(k)$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k), k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (3)$$

여기에서 K 는 공간 공분산 행렬을 계산할 때 사용하는 수신 신호의 샘플 수를 나타내고 $\mathbf{n}(k)$ 는 각 배열에 존재하는 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 잡음 샘플을 그리고 $\mathbf{s}(k)$ 는 복소 신호 벡터로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{s}(k) = [s_0(k) \ s_1(k) \ \dots \ s_{D-1}(k)]^T \quad (4)$$

여기에서 $s_i(k)$, $i = 0, 1, \dots, D-1$ 는 공간상에 존재하는 복소 신호 샘플을 나타내고 D 는 각 배열에 입사하는 신호원들의 수이다. 또한 배열 조향 벡터로 구성된 행렬 \mathbf{A} 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{j\gamma \cos \theta'_0} & e^{j\gamma \cos \theta'_1} & \dots & e^{j\gamma \cos \theta'_{D-1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j\gamma(N-1)\cos \theta'_0} & e^{j\gamma(N-1)\cos \theta'_1} & \dots & e^{j\gamma(N-1)\cos \theta'_{D-1}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기에서 θ'_i 는 신호원의 실제 DoA 각을 나타내고 입사 신호 벡터의 공간 공분산 행렬 (spatial covariance matrix) \mathbf{R}_{xx} 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{X}(k)\mathbf{X}^H(k) \quad (6)$$

가중치 벡터와 공간 공분산 행렬의 연산을 통하여 배열 안테나의 출력 전력 스펙트럼을 식 (7)과 같이 구할 수 있다. 지연합 (delay-and-sum) 알고리즘으로 널리 알려져 있는 FM (Fourier method) 알고리즘은 식 (7)에 주어진 전력 스펙트럼을 이용하여 빔 형성을 수행한다^[1].

$$\begin{aligned} P_{FM}(\theta) &= E\{|y(k)|^2\} \\ &= E\{|\mathbf{W}^H \mathbf{X}(k)|^2\} \\ &= \mathbf{W}^H E\{\mathbf{X}(k)\mathbf{X}^H(k)\} \mathbf{W} \\ &= \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W} \end{aligned} \quad (7)$$

2. Capon 스펙트럼

Capon 빔형성 알고리즘은 특정 방향으로 입사하는 신호의 이득은 일정하게 유지하면서 간섭 신호 또는 잡음

음에 대해서는 상대적으로 작은 가중치를 주어 출력 신호의 SNR을 극대화하는 스펙트럼 추정기를 설계할 수 있다. 스펙트럼 추정기의 배열 응답 (array response)을 $\alpha(\theta)$ 라 하면 Capon 알고리즘의 최적 가중치 벡터 \mathbf{W}_c 는 $\mathbf{W}^H \alpha(\theta) = 1$ 이라는 제한 조건 하에서 식 (7)을 최소화하는 제한된 최적화 문제 (constrained optimization problem)의 해가 되며 그 결과는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{W}_c = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \alpha(\theta)}{\alpha^H(\theta) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \alpha(\theta)} \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하여 정리하면 Capon 스펙트럼을 얻을 수 있으며 그 결과는 식 (9)와 같다^[5~6].

$$\begin{aligned} P_c(\theta) &= \mathbf{W}_c^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W}_c \\ &= \left(\frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \alpha(\theta)}{\alpha^H(\theta) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \alpha(\theta)} \right)^H \mathbf{R}_{xx} \left(\frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \alpha(\theta)}{\alpha^H(\theta) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \alpha(\theta)} \right) \\ &= \alpha^H(\theta) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \alpha(\theta) \left| \frac{1}{\alpha^H(\theta) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \alpha(\theta)} \right|^2 \\ &= \frac{1}{\alpha^H(\theta) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \alpha(\theta)} \end{aligned} \quad (9)$$

3. 제안 알고리즘

제안하는 알고리즘의 설명을 위하여 그림 2와 같이 세 개의 안테나로 구성된 ULA 시스템을 고려하였다. 그림 2에서 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$ 는 각각의 안테나에 수신되는 신호

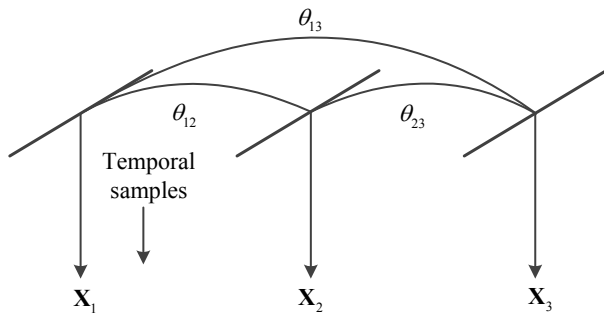


그림 2. ULA 안테나의 구조 ($N=3$)

Fig. 2. Structure of the ULA antenna. ($N=3$)

호의 시간적인 샘플들로 구성된 벡터를 나타낸다. 신호원의 DoA는 각 안테나에 입사되는 신호의 위상 차이에 의하여 얻을 수 있다. 첫 번째와 두 번째, 두 번째와 세 번째 그리고 첫 번째와 세 번째 안테나의 수신 신호들에 의하여 계산된 위상 차이를 각각 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ 라 할 때, 이상적인 경우 θ_{12} 와 θ_{23} 는 같아야 하지만 각 안테나의 수신 신호 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$ 에 존재하는 잡음의 영향으로 θ_{12}, θ_{23} 는 서로 다른 값을 갖게 된다. 한편 공간 스펙트럼을 통하여 수신 신호의 DoA를 추정할 때 조향각 θ 가 θ_{12} 및 θ_{23} 와 일치할 때 큰 값을 갖게 된다. 그러나 수신 신호에 존재하는 잡음의 영향으로 θ_{12}, θ_{23} 가 서로 다르므로 조향각 θ 가 θ_{12} 및 θ_{23} 와 같아질 때 각각 큰 값을 가지게 되며 최종 스펙트럼의 경우 조향 결과가 모두 더해져서 나타나므로 신호원의 입사각에 해당되는 조향각을 중심으로 비교적 넓은 폭의 스펙트럼이 얻어진다. 따라서 수신 신호의 SNR이 낮은 경우 Capon 알고리즘은 낮은 분해능을 갖는 문제가 있다. 위와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 공분산 역행렬 (inverse covariance matrix)의 원소 제거 기법을 제안한다. 제안하는 기법을 통하여 최종 스펙트럼에 나타나는 θ_{23} 의 영향을 제거함으로써 θ_{12} 와 θ_{23} 를 모두 고려한 경우의 스펙트럼보다 좁은 폭의 스펙트럼이 얻어지고 결과적으로 향상된 분해능을 얻을 수 있다.

수학적 전개를 위하여 $N=3$ 이고 크기가 a 인 복소 신호원 $a e^{jw_k}$ 이 AWGN 잡음환경에서 안테나에 입사하는 경우를 고려하여 계산된 공분산 행렬은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R}_{xx} = \begin{bmatrix} |a|^2 + \sigma^2 & |a|^2 e^{-j\phi'} & |a|^2 e^{-j2\phi'} \\ |a|^2 e^{j\phi'} & |a|^2 + \sigma^2 & |a|^2 e^{-j\phi'} \\ |a|^2 e^{j2\phi'} & |a|^2 e^{j\phi'} & |a|^2 + \sigma^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기에서 $\phi' = \gamma \cos \theta'$ 이고 σ^2 은 잡음의 분산을 나타낸다. 공분산 역행렬은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있고 $\det(\mathbf{R}_{xx})$ 항은 편의상 생략하였다. 제안하는 기법을 설명하기 위하여 배열 응답 $\alpha(\theta)$ 에 의하여 조향되는 공분산 역행렬 첫 번째 행의 단일 항들을 제외한 나머지 항들에 가중치 G 가 곱해진 형태로 나타내었다.

$$\mathbf{R}_{xx}^{-1} = \begin{bmatrix} (2|a|^2\sigma^2 + \sigma^4) & -(e^{-j\phi'}(|a|^2\sigma^2)) & -(e^{-j2\phi'}(|a|^2\sigma^2)) \\ -G(e^{j\phi'}(|a|^2\sigma^2)) & G(2|a|^2\sigma^2 + \sigma^4) & -G(e^{-j\phi'}(|a|^2\sigma^2)) \\ -G(e^{j2\phi'}(|a|^2\sigma^2)) & -G(e^{j\phi'}(|a|^2\sigma^2)) & G(2|a|^2\sigma^2 + \sigma^4) \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)의 공분산 역행렬에서 가중치 G 를 0으로 설정하고 식 (9)에 적용하면 제안하는 알고리즘의 스펙트럼을 식 (12)와 같이 나타낼 수 있으며 여기에서 $\phi = \gamma \cos \theta$ 이다.

$$P_{MC}(\theta) = \frac{1}{\alpha^H(\theta) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \alpha(\theta)} = \frac{1}{(2|a|^2 \sigma^2 + \sigma^4) - e^{j\phi}(e^{-j\phi'}(|a|^2 \sigma^2)) - e^{j2\phi}(e^{j2\phi'}(|a|^2 \sigma^2))} \quad (12)$$

기존의 Capon (Conventional Capon, CC) 알고리즘은 빔 스캔을 통하여 배열 안테나의 조향 각이 신호원의 DoA 각과 일치할 경우 Capon 스펙트럼의 값이 최대가 된다. 그러나 앞에서 기술한 바와 같이 잡음에 의한 변량이 모두 더해진 평균적인 분해능을 갖는 스펙트럼을 얻게 되므로 CC 알고리즘은 입사 신호의 SNR이 낮은 경우 분해능이 급격히 떨어져 스펙트럼에서 각 신호원을 구분할 수 없는 단점이 있다. 반면 제안하는 기법 (Modified Capon, MC)의 경우 CC 알고리즘에 비하여 보다 좋은 분해능을 제공할 수 있다. MC 알고리즘에서 공분산 역행렬의 원소 제거 기법을 사용함으로써 CC 알고리즘과 비교했을 경우 신호원의 입사각을 추정하는데 보다 작은 개수의 안테나 간 위상값이 사용된다. 따라서 CC 기법에 비하여 추정 입사각의 지터 (jitter)가 클 것으로 예상할 수 있으나 추정 입사각에 대한 RMSE (root mean square error) 값을 비교한 결과 지터에 의한 성능 저하는 미미한 것으로 확인하였다.

III. 전산 실험 결과

CC 알고리즘과 제안하는 기법을 적용한 MC 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 전산실험을 수행하였다. 그림 3은 $N=3$, DoA는 70° 와 85° , $K=960$ 그리고 SNR은 20 dB인 경우에 대하여 CC 알고리즘과 MC 알고리즘의 출력 전력 스펙트럼을 20회 반복하여 그린 결과이다. 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 제안하는 알고리즘의 분해능이 기존의 알고리즘보다 우수함을 확인할 수 있다.

그림 4와 5는 안테나 수가 각각 3, 5인 경우에 대하여 CC 알고리즘과 MC 알고리즘의 SNR에 따른 추정 입사각의 RMSE를 나타낸 결과이다*.

* CC 알고리즘의 경우 신호원들의 입사각들이 유사할 경우 두 신호원을 구분하지 못하는 경우가 있으나

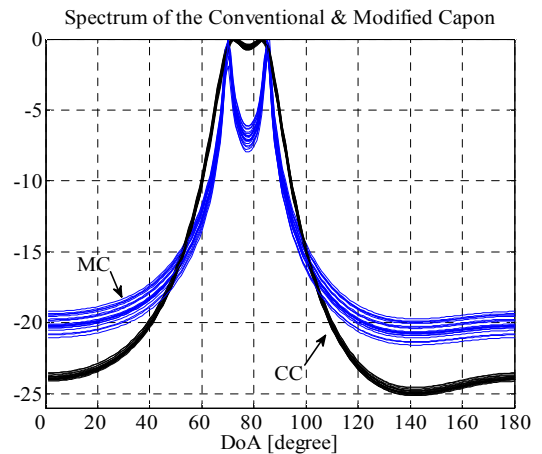


그림 3. 출력 전력 스펙트럼 비교
Fig. 3. Comparison of the output power spectrum.

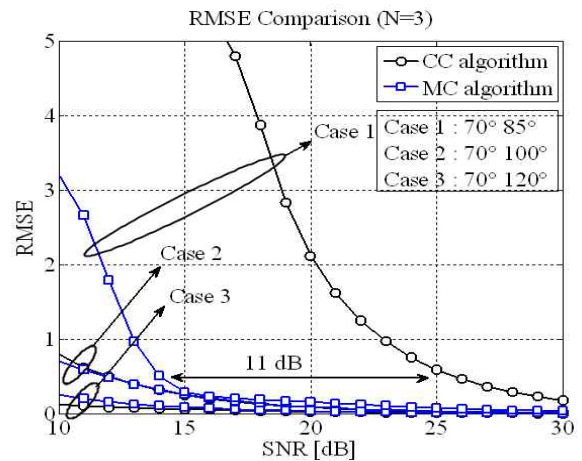


그림 4. RMSE 성능 비교 ($N=3$)
Fig. 4. Comparison of the RMSE performances ($N=3$).

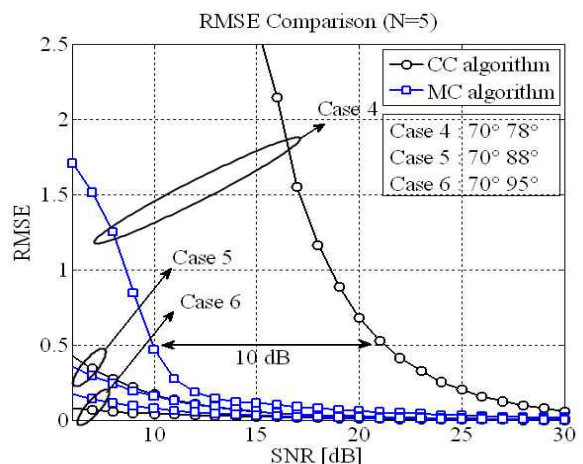


그림 5. RMSE 성능 비교 ($N=5$)
Fig. 5. Comparison of the RMSE performances ($N=5$).

두 알고리즘 모두 신호원을 구분한 경우에 한하여 RMSE를 구하고 이를 그림 4와 5에 나타내었다.

그림 4와 5에서는 신호원들의 DoA가 서로 다른 여섯 가지의 경우에 대하여 SNR에 따른 RMSE를 확인하였으며 스펙트럼에서 신호원의 DoA를 추정하기 위한 임계값 (threshold values)으로는 침두치와 최소치의 중간 값으로 설정하였다.

그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 Case 1에서 0.5 이하의 RMSE 값을 얻는데 필요한 SNR은 CC 알고리즘이 약 25 dB이고 MC 알고리즘은 약 14 dB로 11 dB정도의 성능이득이 있다. Case 2에서도 마찬가지로 MC 알고리즘의 성능이 약간 우수함을 확인할 수 있다. 하지만 두 신호원의 DoA 값에 차이가 큰 경우에 해당하는 Case 3에서는 CC 알고리즘이 MC 알고리즘에 비하여 더 나은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 신호원들이 공간적으로 충분히 멀리 떨어져 있는 경우 CC 알고리즘의 잡음에 의한 변량보다 MC 알고리즘에서 공분산 역행렬의 원소들을 제거하여 발생한 지터 (jitter)가 스펙트럼의 분해능에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 하지만 CC 알고리즘과 MC 알고리즘의 RMSE 성능 차이는 미미할 뿐만 아니라 5 dB 이상의 SNR에서는 각각의 RMSE 값이 거의 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 제안한 알고리즘에서 사용하는 공분산 역행렬 원소 제거 기법으로 인한 지터의 영향을 크지 않음을 확인할 수 있다.

그림 5에서도 그림 4의 경우와 마찬가지로 Case 4에서 CC 알고리즘 대비 MC 알고리즘이 약 10 dB정도의

성능 이득을 갖고 Case 5와 Case 6에서도 거의 동일한 RMSE 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

표 1, 표 2 그리고 표 3은 실험에서 고려한 Case 1, Case 2 그리고 Case 4의 경우에 대하여 신호원들의 DoA 구분 확률을 각각 나타낸 결과로 스펙트럼을 통하여 인접한 2개의 신호원을 구분해낸 횟수를 백분율로 표시하였다. 표들에서 확인할 수 있는 바와 같이 CC 알고리즘에 비하여 MC 알고리즘의 분해능이 훨씬 뛰어나다. 논문에 제시하지는 않았으나 Case 3, Case 5 그리고 Case 6의 경우에는 전산 실험에서 고려한 모든 경우에 두 알고리즘 모두 신호원을 100% 구분하였다.

IV. 결 론

기존의 Capon 알고리즘의 분해능은 입사 신호의 SNR 이 낮은 경우 급격히 저하되는 문제가 있어 신호원들의 입사각이 유사한 경우 각각의 신호원을 구분하지 못하는 문제가 있다. 본 논문에서는 Capon 알고리즘에서 사용되는 공분산 역행렬의 원소를 제거하는 기법을 제안하였다. 제안하는 기법을 통해 수신 신호의 SNR이 낮은 환경에서 기존의 알고리즘보다 개선된 분해능을 얻을 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

표 1. [Case 1] 신호원들의 DoA 구분 확률 ($N=3$)
Table 1. [Case 1] Detection rates for the DoA of the sources ($N=3$).

SNR	8 dB	10 dB	12 dB	14 dB	16 dB	18 dB
CC	0%	0%	0%	0%	0.6%	91.3%
MC	0%	8.1%	92.8%	100%	100%	100%

표 2. [Case 2] 신호원들의 DoA 구분 확률 ($N=3$)
Table 2. [Case 2] Detection rates for the DoA of the sources ($N=3$).

SNR	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB
CC	57.4%	81.5%	97.1%	99.8%	100%	100%
MC	100%	100%	100%	100%	100%	100%

표 3. [Case 4] 신호원들의 DoA 구분 확률 ($N=5$)
Table 3. [Case 4] Detection rates of the DoA of the sources ($N=5$).

SNR	6 dB	8 dB	10 dB	12 dB	14 dB	16 dB
CC	0%	0%	0%	0%	0.1%	87.5%
MC	0.1%	54.6%	99.5%	100%	100%	100%

- [1] L. C. Godara, "Application of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II: Beam-Forming and Direction of Arrival Considerations," *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 8, pp. 1195-1245, Aug. 1997.
- [2] J. H. Winters, "Smart Antennas for Wireless Systems," *IEEE Trans. SP*, vol. 40, pp. 2007-2028, Aug. 1992.
- [3] H. Krim and M. Viberg, "Two Decades of Array Signal Processing research," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 67-94, Jul. 1996.
- [4] J. Capon, "High-Resolution Frequency Wavenumber Spectrum Analysis," *Proc. IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, Aug. 1969.
- [5] C. D. Richmond, "Capon Algorithm Mean Squared Error Threshold SNR Prediction and Probability of Resolution," *IEEE Trans. on Signal process.*, vol. 53, no. 8, pp. 2748-2764, Aug. 2005.
- [6] J. R. Guerci, "Space-Time Adaptive Processing for Radar," Artech House, Boston, London, 2003.

저 자 소 개



김 성 민(학생회원)
2010년 충남대학교 전기정보통신
공학부 학사
2010년~현재 충남대학교
전자전파정보통신공학과
석사과정

<주관심분야 : 신호처리, 이동통신 시스템>



나 선 필(정회원)
1985년 충남대학교 계산통계학과
학사
1987년 충남대학교 계산통계학과
석사
2011년 현재 국방과학연구소 재직

<주관심분야: 신호감시, 신호처리>



강 동 훈(학생회원)
2009년 충남대학교 전기정보통신
공학부 학사
2009년~현재 충남대학교
전자전파정보통신공학과
석·박사통합과정

<주관심분야 : 채널 코딩, STBC, 이동통신 시스템>



오 왕 록(정회원)-교신저자
1994년 포항공과대학교 전자전기
공학과 학사
1997년 포항공과대학교 정보통신
공학과 석사
2003년 포항공과대학교 전자전기
공학과 박사

1994년~1995년 스탠더드텔레콤 연구원
2003년~2006년 포항공과대학교 정보통신연구소
전임연구원

2006년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부
부교수

<주관심분야 : 터보 코드, MIMO 시스템, 유무선
디지털 통신>



이 용 옥(학생회원)
2008년 충남대학교 전기정보통신
공학부 학사
2010년 충남대학교 전자전파정보
통신공학과 석사
2010년~2011년 삼성전자 연구원
2011년~현재 충남대학교 전자
전파정보통신공학과
박사과정

<주관심분야 : 디지털 통신, OFDMA, 항 재밍 시
스템>