

신호 대 잡음비가 낮은 경우 광대역 신호의 입사각 추정

On Estimating the Incident Angles of Wide Band Signals in Low SNR Environment

조 정 권*, 황 영 수**, 차 일 환**, 윤 대 희**

(J. K. Cho, Y. S. Hwang, I. W. Cha, D. H. Youn)

요 약

UCERSS (Unit Circle Eigendecomposition Rational Signal Subspace) 알고리즘은 MUSIC(MULTiple Signal Classification) 알고리즘을 2차원으로 확장하여 단위원 상에서의 eigendecomposition을 이용함으로써 다수의 광대역 신호의 입사각을 추정해 왔다.

이 논문의 목적은 신호대잡음비가 아주 낮은 경우에도 다수의 광대역 신호의 입사각을 추정할 수 있도록 UCERSS 알고리즘을 개선하는데 있다.

잡음 성분을 줄이기 위해 covariance difference 행렬을 이용한 ESPRIT(Estimation of Signal Parameter via Rotational Invariance Technique) 알고리즘을 UCERSS 알고리즘과 결합하여 2차원으로 확장시킨 wide band ESPRIT 알고리즘을 제시하였다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제시된 알고리즘의 성능을 UCERSS 알고리즘의 성능과 비교하여 제시된 알고리즘의 성능이 우수함을 보였다.

ABSTRACT

The UCERSS(Unit Circle Eigendecomposition Rational Signal Subspace) algorithm has extended MUSIC(MULTiple Signal Classification) by using eigendecomposition on the unit circle in order to estimate incident angles of multiple wide band signals.

The purpose of this thesis is to further extend the UCERSS to be able to estimate the direction of arrivals of multiple wide band signals in very low SNR.

The wide band ESPRIT(Estimation of Signal Parameter via Rotational Invariance Technique) uses covariance difference matrices to reduce noise components.

In this paper the wide band ESPRIT which combines the ideas of UCERSS and ESPRIT is proposed.

Computer simulation results indicate that the performances of the proposed approaches are superior to those of the UCERSS in very low SNR.

*삼성종합기술원 전자기기 연구소

**연세대학교 공과대학 전자공학과

I. 서 론

Radar, sonar, seismic 신호처리에서 센서 array로부터 수신된 stationary time series로부터 신호의 입사각을 추정하는 문제는 오래전부터 활발히 연구되어 왔다. ⁽²²⁾⁽²⁵⁾

R.O. Schmidt ⁽²⁶⁾는 다수의 협대역 신호에 대하여 신호의 벡터 공간(vector space)을 신호 부분공간(signal subspace)과 잡음 부분공간(noise subspace)으로 나누어 신호의 입사각에 해당하는 방향 벡터(direction vector)가 잡음 부분공간을 형성하는 고유벡터(eigenvector)와 직교하는 성질을 이용하여 다른 알고리즘에 비하여 bias가 적고, 해상도가 우수한 ⁽²⁶⁾MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘을 제시하였다.

G.Su와 M.Morf ⁽²³⁾는 다수의 광대역 신호의 입사각 추정을 위하여 MUSIC 알고리즘을 2차원으로 확장시킨 UCERSS(Unit Circle Eigendecomposition Rational Signal Subspace) 알고리즘을 제시하였다.

UCERSS 알고리즘에서는 유리 함수(rational function)로 이루어진 신호의 벡터공간을 구성한후 spectral density 행렬을 단위원상에서 eigendecomposition 함으로써 광대역 신호를 처리하였다.

입사각을 추정하는 모든 알고리즘의 공통된 문제로서 신호대잡음비가 낮은 경우에는 bias가 커지고, 해상도가 떨어진다⁽¹⁾⁽¹²⁾.

본 논문에서는 다수의 광대역 신호의 입사각을 추정하기 위한 UCERSS 알고리즘을 개선하여 신호대잡음비가 낮은 경우에도 성능이 저하되지 않는 wide band ESPRIT 알고리즘을 제시하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 UCERSS 알고리즘의 성능과 비교하였다.

II. UCERSS 알고리즘

P개의 광대역 신호가 서로 다른 방향에서 M개의 센서로 이루어진 등간격 d의 선형 array로 평행 입사하며 잡음은 공간적으로 상관관계가 없으며 Gaussian 이라고 가정하면, i번째 센서에서 받은 신호를 다음과 같은 superposition으로 얻을 수 있

다.

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^P a_j(\theta_j, t) * u_j(t) + \mu_i(t) \quad (2-1)$$

$$1 \leq i \leq M$$

여기에서 $a_j(\theta_j, t)$ 는 j번째 source에 대한 i번째 센서의 임펄스 응답(impulse response)이며, *는 convolution 기호이고, $u_j(t)$ 는 j번째 신호, $\mu_i(t)$ 는 i번째 센서 출력에서의 부가잡음이다.

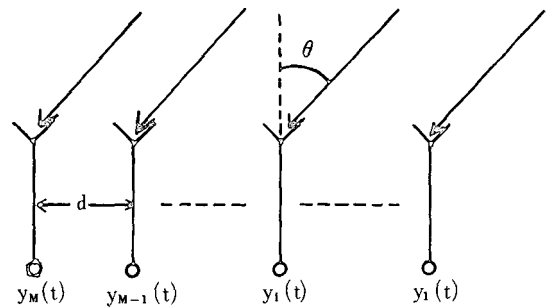


그림1. M개 센서로 이루어진 등간격의 선형 array
equally spaced linear array containing M sensors

식 (2-1)을 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$y(t) = \sum_{j=1}^P a(\theta_j, t) * u_j(t) + \mu(t) \quad (2-2-a)$$

$$= A * u(t) + \mu(t)$$

여기에서 $y(t)$, $\mu(t)$ 는 $M \times 1$, $u(t)$ 는 $P \times 1$ 의 열 벡터이다.

$$y^T(t) = [x_1(t) \dots \dots \dots x_M(t)] \quad (2-2-b)$$

$$\mu^T(t) = [\mu_1(t) \dots \dots \dots \mu_M(t)] \quad (2-2-c)$$

$$u^T(t) = [u_1(t) \dots \dots \dots u_P(t)] \quad (2-2-d)$$

식 (2-2-a)를 Z 변환하면 다음과 같다.

$$y(z) = A(z)u(z) + \mu(z) \quad (2-3)$$

여기서 $A(z) = [a(\theta_1, z) \dots \dots \dots a(\theta_P, z)]$ 이다.

센서 출력 $y(z)$ 의 spectral density $S(z)$ 를 신호 spectral density와 잡음 spectral density로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 S(z) &= E\{y(z)y^T(z^{-1})\} \\
 &= A(z)E\{u(z)u^T(z^{-1})\}A^T(z^{-1}) + E\{\mu(z)\mu^T(z^{-1})\} \quad (2-4)
 \end{aligned}$$

$Z = e^{j\phi}$ 로 나타내면 식(2-4)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_\phi = S_{NF\phi} + \rho_w \Sigma_\phi \quad (2-5)$$

여기에서 $S_{NF\phi}$ 는 신호 성분만의 spectral density이며, $\Sigma_\phi^{H/2}$ 은 잡음의 spectral density Σ_ϕ 의 Hermitian square root, ρ_w 는 잡음의 분산이다. 식(2-5)의 양변에 각각 $\Sigma_\phi^{-1/2}$ 과 $\Sigma_\phi^{H/2}$ 를 곱하면 다음과 같다.

$$\Sigma_\phi^{-1/2} S_\phi \Sigma_\phi^{H/2} = \Sigma_\phi^{-1/2} S_{NF\phi} \Sigma_\phi^{H/2} + \rho_w I \quad (2-6)$$

$\Sigma_\phi^{-1/2} S_{NF\phi} \Sigma_\phi^{H/2}$ 의 rank는 P이므로 $M-P$ 개의 고유치는 영이다.

식(2-6)의 우변 첫째 항은 다음과 같이 eigendecomposition된다.

$$\Sigma_\phi^{-1/2} S_{NF\phi} \Sigma_\phi^{H/2} = E_\phi \begin{bmatrix} \Lambda_{P\phi} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} E_\phi^H \quad (2-7)$$

여기에서 E_ϕ 는 단위 직교 고유벡터를 포함하고, $\Lambda_{P\phi}$ 는 대각상에서 감소순서로 영이 아닌 P개의 고유치를 포함한다.

$E_\phi E_\phi^H = I$ 이므로 식(2-6)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Sigma_\phi^{-1/2} S_\phi \Sigma_\phi^{H/2} &= E_\phi \begin{bmatrix} \Lambda_{P\phi} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} E_\phi^H + \rho_w E_\phi E_\phi^H \\
 &= E_\phi \Lambda_\phi E_\phi^H \quad (2-8)
 \end{aligned}$$

$$\text{여기에서 } \Lambda_\phi = \begin{bmatrix} \Lambda_{P\phi} + \rho_w I & 0 \\ 0 & \rho_w \end{bmatrix} \text{이다.} \quad (2-9)$$

식(2-7)과 (2-8)로부터 $S_{NF\phi}$ 는 다음과 같이 eigendecomposition 된다.

$$S_{NF\phi} = \Sigma_\phi^{1/2} E_{P\phi} \Lambda_{P\phi} E_{P\phi}^H \Sigma_\phi^{H/2} \quad (2-10)$$

그리고, $S_{NF\phi}$ 의 spectral factor $S_{NF\phi}^{1/2}$ 는 다음과 같다.

$$S_{NF\phi}^{1/2} = \Sigma_\phi^{1/2} E_{P\phi} \Lambda_{P\phi}^{1/2} \quad (2-11)$$

식(2-10), (2-11)의 역 Fourier 변환은 다음과 같다.

$$S_{NF}(Z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Z^{-k} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S_{NF\phi} e^{jk\phi} d\phi \quad (2-12-a)$$

$$S_{NF}^{1/2}(Z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Z^{-k} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S_{NF\phi}^{1/2} e^{jk\phi} d\phi \quad (2-12-b)$$

식(2-12-a)의 spectral density는 단위원상의 보간점(interpolation point)에서 계산되는데 본 논문에서는 센서의 출력이 식(2-1)과 같은 moving average 모델이므로 다음과 같은 moving average 보간법 [1]을 사용하였다.

$$S(z) = C(z)C^T(z^{-1}) = \sum_{i=-n}^n b_i(z)S_i \quad (2-13)$$

여기에서 $b_i(z)$ 는 보간함수(interpolation function)로 다음과 같다.

$$b_i(z) = \frac{1}{2n+1} \sum_{k=-n}^n W^{ki} Z^k \quad (2-14)$$

신호의 스펙트럼에 대한 정보를 미리 알고 있지 못하는 상황에서 신호 부분공간의 추정시 전 주파수 대역에 걸쳐 같은 비중을 두는 것이 타당하므로 보간점은 단위원상에서 균일하게 분포한다.

$$Z = W^T = \exp \left[j2\pi \frac{l}{2n+1} \right] \quad -n \leq l \leq n \quad (2-15)$$

Spectral density 행렬, s_l 는 단위원 상의 보간점에서 T개의 snapshot 벡터, $g(i)$ 로 부터 계산된 covariance 행렬, R_k 를 DFT(Discrete Fourier Transform) 하여 얻어 진다.

$$R_k = \frac{1}{T-k} \sum_{t=k+1}^T g(t)g^T(t-k) \quad -n \leq k \leq n \quad (2-16)$$

$$S_l = \sum_{k=-n}^n w(k) R_k \exp \left[-j2\pi \frac{kl}{2n+1} \right] \quad 0 \leq l \leq n \quad (2-17)$$

여기에서 $w(k)$ 는 가중함수 (weighting function) 이다.

$n+1$ 개의 spectral density 행렬을 각각 eigendecomposition하여 고유치와 각 보간점에서 계산된 spectral density 행렬을 eigendecomposition하여 고유치와 고유벡터를 얻은 후 신호 부분공간의 차원을 추정한 뒤 잡음 부분공간을 구성하는 고유벡터와 방향 벡터사이의 Euclidean 거리 $d(\theta)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$d^2(\theta) = \sum_{i=1}^n f_i \|a_i^H(\theta) E_{ic}\|^2 \quad (2-18)$$

여기서 E_{ic} 는 잡음 부분공간을 형성하는 고유벡터를 열로 하는 행렬이고, λ_{ii} 이 신호 부분공간에 대응하는 고유치일때 f_i 은 $f_i > 0$ 인 가중함수이다.

$$f_i = \begin{cases} \frac{1}{n} & , \text{ unweighted} \\ \sum_{i=1}^p \lambda_{ii} & , \text{ weighted} \end{cases} \quad (2-19)$$

따라서 UCERSS 알고리즘에서의 공간 스펙트럼 추정식은 다음과 같이 정의 된다.

$$P_{UCERSS}(\theta) = \frac{1}{d^2(\theta)} = \frac{1}{f_0 \|a_0^H(\theta) E_{oc}\|^2 + \sum_{i=1}^n 2f_i \|a_i^H(\theta) E_{ic}\|^2} \quad (2-20)$$

β 가 array spacing 파라메타이고, $\tau = \frac{2\pi\beta l}{2n+1}$

일때 전파 벡터 $a_l(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$a_l^T(\theta) = [1 \quad e^{j(M-1)\tau \sin \theta}] \quad (2-21)$$

III. Wide Band ESPRIT 알고리즘

입사각을 추정하는 모든 알고리즘의 공통된 문제로서 신호대잡음비가 낮은 상황에서는 성능이 저하되어 입사각 추정이 어려워진다.

MUSIC, UCERSS 알고리즘의 경우 다른 알고리즘에 비하여 bias가 적고, 해상도(resolution)가 높은 공간 스펙트럼을 얻을 수 있으나⁽⁶⁾신호대잡음비가 현저히 낮은 경우 입사각을 정확히 추정하지 못하게 된다.

신호대잡음비가 극히 낮은 상황에서도 입사각을 정확히 추정할 수 있는 방법이 covariance difference 알고리즘이다⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽²⁰⁾.

Paulraj와 Kailath⁽⁸⁾⁽⁹⁾는 협대역 신호에 대해서 두 번 측정된 snapshot 벡터를 가지고 covariance 행렬을 각각 구한 후 그 차를 이용하여 MUSIC 알고리즘을 적용하였다.

Covariance difference 알고리즘에서는 rotational invariance, temporal invariance, translational invariance 등을 이용하는데⁽⁸⁾⁽⁹⁾ rotational invariance를 이용한 알고리즘을 ESPRIT(Estimation of Signal Parameter via Rotational Invariance Technique)이라고 부른다.

본 논문에서는 ESPRIT와 UCERSS 알고리즘을 결합하여 광대역 ESPRIT 알고리즘을 제시하였는데 이를 wide band ESPRIT라고 부르기로 한다.

두 번 측정하는 동안 잡음의 통계가 long-term stationary 라고 가정하면 기준 측정과 array를 α 만큼 회전시킨 후에 측정에서 얻은 snapshot 벡터로 부터 각각 계산된 covariance 행렬과 그 차로 구한 covariance difference 행렬은 다음과 같다.

$$R_{1k} = A_1 P_{1k} A_1^H + W \quad (3-1-a)$$

$$R_{2k} = A_2 P_{2k} A_2^H + W \quad (3-1-b)$$

$$D_k = R_{1k} - R_{2k}$$

$$= [A_1 \ A_2] \begin{bmatrix} P_{1k} & 0 \\ 0 & -P_{2k} \end{bmatrix} [A_1 \ A_2]^H \quad (3-1-c)$$

$-n \leq k \leq n$

이상적으로 D_k 는 잡음성분을 갖지 않고, 고유치가 실수인 indefinite 행렬이며 각 보간점에서 spectral density 행렬은 다음과 같이 계산된다.

$$S_l = \sum_{k=-n}^n D_k \exp[-j2\pi \frac{kl}{2n+1}] \quad 0 \leq l \leq n \quad (3-2)$$

P_{1k} 와 P_{2k} 가 nonsingular이고 positive definite 행렬이며 A_1 과 A_2 의 열이 선형독립이면 wide band ESPRIT 알고리즘에서의 고유치와 고유벡터는 다음과 같은 성질을 만족한다.

(a) $M-2P$ 개의 영 고유치가 존재한다.

$$\lambda_{P+1} = \dots = \lambda_{M-P} = 0 \quad (3-3)$$

(b) 영 고유치에 대응하는 고유벡터는 $[A_1 \ A_2]$ 의 열과 결합직교한다.

$$\{y_{k, P+1}, \dots, y_{k, M-P}\} \perp \{a_{k, i}, j=1, P; i=1, 2\} \quad (3-4)$$

여기에서 $v_{k,m}$ 은 k 번째 covariance 행렬의 m 번째 고유벡터이다.

식(3-4)에서 영 고유치에 대응하는 고유벡터가 $[A_1 \ A_2]$ 의 열과 결합직교 (jointly orthogonal) 하므로 공간 스펙트럼 추정식은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{WBE}(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n [a_i^H(\theta) E_{ic} E_{ci}^H a_i(\theta) + a_i^H(\theta + \alpha) E_{ic} E_{ci}^H a_i(\theta + \alpha)]} \quad (3-5)$$

여기에서 E_{ic} 는 $M-2P$ 개의 영 고유치에 대응하는

고유벡터를 열로 하는 $M \times (M-2P)$ 행렬이다.

식 (3-5)로 계산되는 wide band ESPRIT 알고리즘에서의 공간 스펙트럼 추정식이 나타내는 비와 같이 θ 에서 실제 입사신호가, $\theta + \alpha$ 에서 phantom 신호가 나타나므로 phantom 신호의 영향을 줄이기 위해 다음과 같은 식을 사용한다.

$$P_{MWE}(\theta) = \frac{1}{1 - P_{WBE}(\theta)} \quad (3-6)$$

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

2장에서 설명한 UCERSS 알고리즘과, 3장에서 제안된 wide band ESPRIT 알고리즘을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 비교하였다.

시뮬레이션에서의 조건은 특별한 언급이 없는 한 400개의 snapshot 벡터, 20개의 lag($n=20$), spectral density 행렬을 구할때 Hamming window 를 사용하였다. 샘플링 주파수에서 array spacing 파라메타는 5이며 공간 스펙트럼을 계산할때 가중을 하지 않았다. ($f_1=1/n$)

센서는 전방향(omnidirectional)으로 동일한 이득을 갖고, 주파수 특성이 평탄하며 선형 array는 등간격으로 분포되어 있다.

시뮬레이션에서는 백색 Gaussian 잡음을 다음과 같은 대역통과 필터에 통과시킨 신호를 지연시켜 사용하였다⁽⁹⁾.

$$\text{Source 1: } \frac{1}{1+0.371Z^{-1}+0.36Z^{-2}}$$

$$\text{Source 2: } \frac{1}{1+0.433Z^{-1}+0.49Z^{-2}}$$

Source 1-2은 모두 0.3Hz의 중심 주파수를 가지며 그림 2. 에서와 같이 스펙트럼이 많이 겹쳐 있음을 알 수 있다. 시뮬레이션에 사용된 신호는 모두 같은 power를 갖고, 신호대잡음비는 (신호의 분산의 합) / (잡음의 분산)으로 정의한다.

공간 스펙트럼 추정시 $l=0$ 인 DC 성분의 spectral density 행렬은 전, 방향센서로 이루어진 array에 대하여 영향을 미치지 않으므로 계산에서 생략하였

신호대 잡음비가 낮은 경우 광대역 신호의 입사각 추정

고, 모든 공간 스펙트럼은 5번의 독립 수행으로 얻은 결과를 겹쳐 그린 것이다.

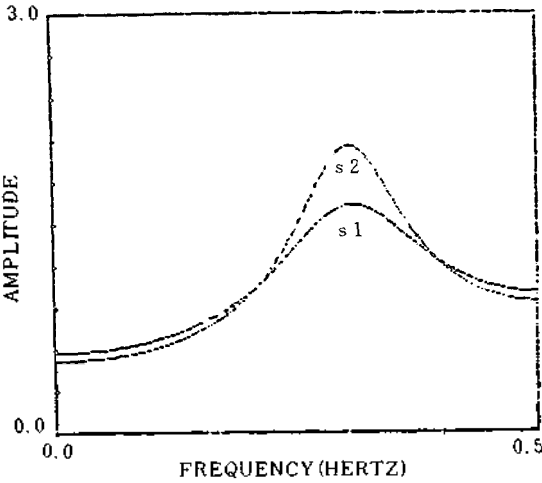


그림2. Source의 스펙트럼
Source spectra.

a. 신호대잡음비가 0 dB 일때

Source 1이 $\theta = -30^\circ$ 에서 source2가 $\theta = -20^\circ$ 에서 입사하는 경우 UCERSS 알고리즘을 이용한 공간 스펙트럼을 그림 3. 과 같다.

신호 부분공간의 차원은 3이고, 센서의 갯수는 6이다.

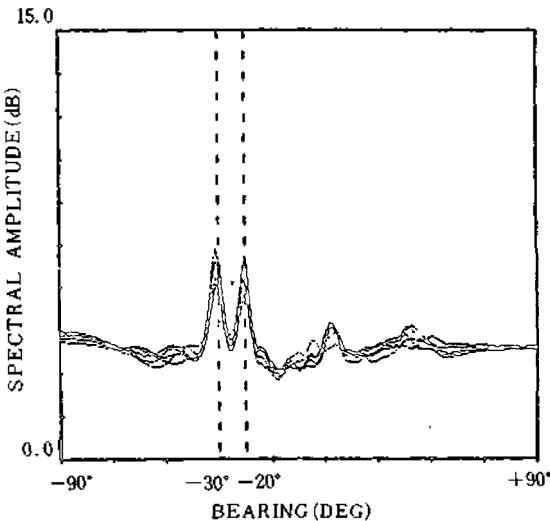


그림3. SNR=0dB 일때 UCERSS를 이용한 공간 스펙트럼
Spatial spectrum using UCERSS in SNR=0dB

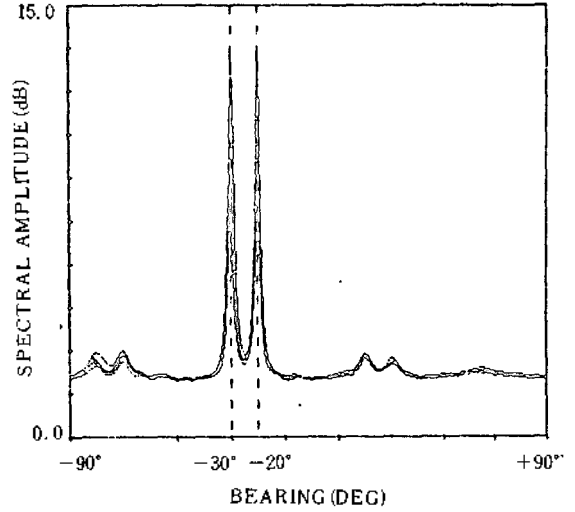


그림4. SNR=0dB 일때 wide band ESPRIT를 이용한 공간 스펙트럼
Spatial spectrum using wide band ESPRIT in SNR=0dB

Wide band ESPRIT 알고리즘을 이용한 공간 스펙트럼은 그림 4. 와 같다.

식(3-3)으로부터 M-2P 개의 영 고유치가 존재하므로 신호 부분공간의 차원은 4이고, 센서의 갯수는 6이며 회전각은 50° 이다.

신호대잡음비가 0 dB 일때는 UCERSS 알고리즘과 wide band ESPRIT 알고리즘이 모두 입사각을 추정하고 있다.

b. 신호대잡음비가 -10 dB 일때

그림5 에서 보는 바와 같이 UCERSS 알고리즘은 신호대잡음비가 -10 dB일때 입사각을 전혀 추정하지 못하지만 wide band ESPRIT 알고리즘은 그림6 과 같이 입사각을 정확히 추정한다.

그림3 에서 6 까지의 결과로 부터 신호대잡음비가 낮지 않은 경우에는 UCERSS와 wide band ESPRIT 의 성능 차이가 크지 않지만, 신호대잡음비가 낮은 경우에는 wide band ESPRIT 알고리즘의 성능이 우수함을 알 수 있다.

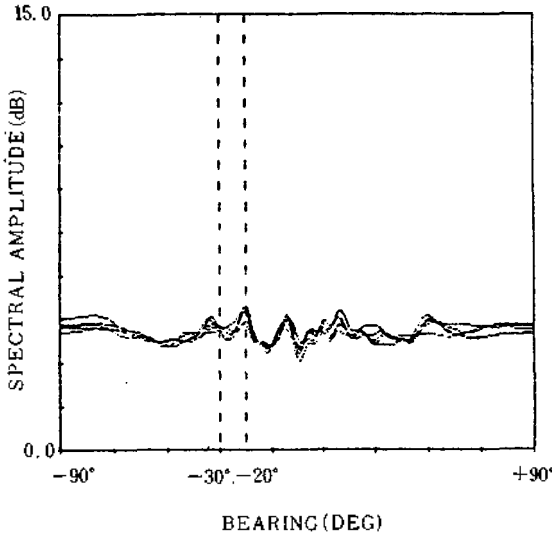


그림5. SIR=-10dB 일때 UCERSS를 이용한 공간 스펙트럼
Spatial spectrum using UCERSS in SNR=-10 dB

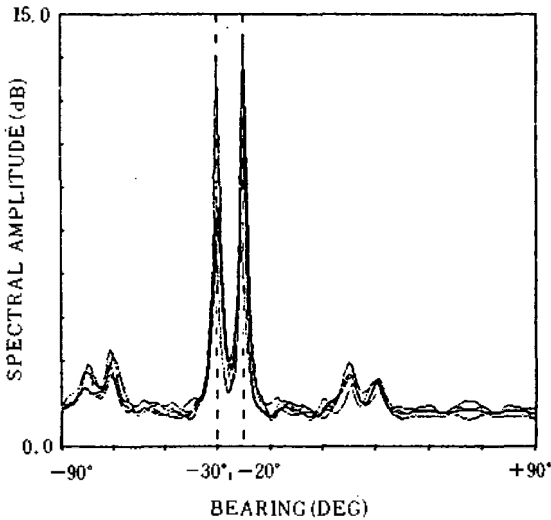


그림6. SNR=-10dB 일때 wide band ESPRIT를 이용한
공간 스펙트럼
Spatial spectrum using wide band ESPRIT in SNR=-10dB

V. 결 론

다수의 광대역 신호의 입사각을 추정하는데 있어서 신호대잡음비가 매우 낮은 경우에도 성능을 유지하기 위해 UCERSS 알고리즘을 개선한 wide band ESPRIT 알고리즘을 제시하고, 컴퓨터 시뮬레이션을

통하여 UCERSS 알고리즘의 성능과 비교하였다.

신호대잡음비가 현저히 낮을 경우에는 wide band ESPRIT 알고리즘의 성능이 UCERSS 알고리즘의 성능보다 우수함을 보였고, 적은 bias와 높은 해상도를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. G. Su and M. Morf, "The Signal Subspace Approach for Multiple Wide-Band Emitter Location," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, Vol. ASSP-31, No. 6, pp. 1502-1522, Dec. 1983.
2. R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, Vol. AP-34, No. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.
3. G. Su and M. Morf, "Modal Decomposition Signal Subspace Algorithms," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, vol. ASSP-34, No.3, pp. 558-602, June 1986.
4. T. J. Shan, M. Wax, and T. Kailath, "On Spatial Smoothing for Direction-of-Arrival Estimation of Coherent Signals," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, Vol. ASSP-33, No. 4, pp. 806-811, Aug. 1985.
5. R. O. Schmidt, "Multiple Source DF Signal Processing: An Experiment System," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, Vol. AP-34, No.3, pp. 281-290, Mar. 1986.
6. J. A. Cadzow, Y. S. Kim, D. C. Shiue, Y. Sun, and G. Xu, "Resolution of Coherent Signals Using Linear Array," *ICASSP 87, Dallas, Texas, 1987.*
7. R. L. Johnson, "Eigenvector Matrix Partition and Radio Direction Finding Performance," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, Vol. AP-34, No. 8, pp. 985-991, Aug. 1986.
8. A. Paulraj and T. Kailath, "Eigenstructure Methods for DOA Estimation in the Presence of Unknown Noise Fields," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, Vol. ASSP-34, No. 13-20, Feb. 1986.
9. R. Roy, A. Paulraj and T. Kailath, "Comparative Performance of ESPRIT and MUSIC for DOA Estimation," *ICASSP 87, Dallas, Texas, 1987.*

10. T. J. Shan, A. Paulraj, and T. Kailath, "On Smoothed Rank Profile Tests in Eigenstructure Methods for DOA Estimation," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, Vol. ASSP-35, No. 10, pp. 1377-1385, Oct. 1987.
11. H. Wang and M. Kaveh, "Coherent Signal Subspace Processing for the Detection and Estimation of Angles of Arrival of Multiple Wide-Band Sources," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, Vol. ASSP-33, No. 4, pp. 823-831, Aug. 1985.
12. M. Zoltowski and F. Haber, "A Vector Space Approach to Direction Finding in a Coherent Multipath Environment," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, Vol. AP-14, No. 9, pp. 1069-1079, Sep. 1986.
13. A. K. Shaw and R. Kumaresan, "Estimation of Angles of Arrivals of Broadband Signals," *ICASSP 87, Dallas, Texas, 1987.*
14. F. Haber and M. Zoltowski, "Spatial Spectrum Estimation in a Coherent Signal Environment Using an Array in Motion," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, Vol. AP-34, No. 3, pp. 301-310 Mar. 1986.
15. R. T. Williams, S. Prasad, A. K. Mahalanabis, and L.H. Sibul, "Localization of Coherent Sources Using A Modified Spatial Smoothing Techniques," *ICASSP 87, Dallas, Texas, 1987.*
16. M. Kaveh and A. J. Barabell, "The Statistical Performance of the MUSIC and the Minimum Norm Algorithms in Resolving Plane Waves in Noise," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, Vol. ASSP-34, No. 2, pp. 331-341, April 1986.
17. D. H. Johnson and S. R. Degraaf, "Improving the Resolution of Bearing in Sonar Arrays by Eigenvalue Analysis," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, Vol. ASSP-30, No. 4, pp. 638-647 Aug. 1982.
18. A. J. Barabell, "Improving the Resolution Performance of Eigenstructure Based Direction-Finding Algorithms," *ICASSP 83, Boston, 1983.*
19. B. Porat and B. Friedlander, "Estimation of Spatial and Spectral Parameters of Multiple Sources," *IEEE Trans. Infor. Theory*, Vol. IT-29, No. 3, pp. 412-425 May 1983.
20. S. Prasad, R. T. Williams, A. K. Mahalanabis, and L. H. Sibul, "A Transform Based Covariance Difference Approach to Bearing Estimation," *ICASSP 87, Dallas, Texas, 1987.*
21. S. R. Degraaf and D. H. Johnson, "Capability of Array Processing Algorithms to Estimate Source Bearing," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, Vol. ASSP-33, No. 6, pp. 1368-1379 Dec. 1985.
22. D. H. Jonson, "The Application of spectral Estimation Methods to Bearing Estimation Problems," *Proc. of IEEE*, Vol. 70, No. 9, pp. 1018-1028 Sept. 1982.
23. S. B. Kesler ed., *Modern Spectrum Analysis II*, IEEE Press, 1986.
24. S. L. Marple, *Digital Spectral Analysis with Applications*, Prentice-Hall, 1987.
25. G. Strang. *Linear Algebra and its Applications*, Academic Press, 1980.
26. S. R. Searle, *Matrix Algebra Useful for Statistics*, Wiley, 1982.
27. S. Haykin, ed., *Nonlinear Methods of Spectral Analysis*, 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1983.
28. 조정권, "신호의 벡터 공간을 이용한 다수의 광대역 신호의 입사각 추정," 석사 학위 논문, 연세대학교, 대학원, 6월, 1988.
29. 조정권, 황영수, 차일환, 윤대회, "Wide Band ESPRIT를 이용한 다수의 광대역 신호의 입사각 추정," 1988년도 통신학회 발표 논문집, 6월, 1988.
30. 조정권, 박영철, 차일환, 윤대회, "다경로인 경우 개선된 알고리즘을 이용한 다수의 광대역 신호의 입사각 추정," 1988년도 전자공학회 발표 논문집, 7월, 1988.

▲조 정 권 (정희원)



1963년 5월 22일생
 1986년 2월 연세대학교전자
 공학과 졸업(공학사)
 1988년 8월 연세대학교대학
 원 전자공학과 졸업
 (공학석사)
 1988년 9월~1989년 7월 삼
 성종합기술원 연구원
 1989년 현재 ABC Computer
 Engineering Executive

▲황 영 수 (정희원)



1960년 4월 9일생
 1982년 2월 연세대학교전자
 공학과 졸업(공학사)
 1984년 2월 연세대학교대학
 원 전자공학과 졸업
 (공학석사)
 1984년~현재 연세대학교 대
 학원 전자공학과 박사
 과정

1989년~현재 관동대학교 전자공학과 전임강사

▲차 일 환 (정희원)



1935년 12월 25일생
 1959년 2월 연세대학교전기
 공학과 졸업(공학석사)
 1983년 8월 연세대학교 대학
 원 전자공학과(공학박
 사)
 1969년~1970년 영국Univer-
 sity of Southampton
 Institute of Sound and
 Vibration 연구원

1986년 9월~1987년 7월 Department of Electri-
 cal and Computer Engineering, University
 of IOWA 교환교수

1988년 8월 연세대학교 전자공학과 교수

▲윤 대 회 (정희원)



1951년 5월 25일생
 1977년 2월 연세대학교전자
 공학과 졸업(공학사)
 1975년 5월 Department of
 Electrical Engineering,
 Kansas State University
 (M. S)
 1982년 5월 Department of
 Electrical Engineering,
 Kansas State Univer-
 sity (Ph. D)

1982년 8월~1985년 6월 Department of Electri-
 cal and Computer Engineering, University of
 IOWA 조교수

1985년 9월~현재 연세대학교 전자공학과 조교수