

論 文

다경로인 경우 광대역 신호의 입사각 추정

正會員 趙 正 權* 正會員 曹 秉 模*

正會員 車 日 煥* 正會員 尹 大 熙*

On Estimating Incident Angles of wide-Band
Signals in Multipath EnvironmentsJeong Kwon CHO*, Byoung Mo CHO*, Il Whan CHA*,
Dae Hee YOUN* *Regular Members*

要 約 MUSIC(Multiple Signal Characterization) 알고리즘은 단위원 상에서의 eigendecomposition을 이용함으로써 UCERSS 알고리즘으로 확장되어 다수의 광대역 신호의 입사각을 추정하였다. 이 논문의 목적은 다수의 광대역 신호가 다경로(multipath)로 입사하는 경우 입사각을 추정할 수 있도록 신호 부분공간을 이용한 UCERSS(SSB-UCERSS)와 공간 smoothing을 이용하는 UCERSS(SS-UCERSS)를 제시하였다. 컴퓨터 시뮬레이션의 결과에서 SSB-UCERSS 알고리즘의 성능이 가장 우수하고 SS-UCERSS 알고리즘은 UCERSS 알고리즘의 성능보다 우수하였다.

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

The purpose of this paper is to present SSB-UCERSS(Signal Subspace Based UCERSS) and SS-UCERSS(Spatially Smoothed UCERSS) estimating the incident angles of multiple wide band signals in multipath(coherent signals) environments. Computer simulation results indicate that SSB-UCERSS yields the best result, while the SS-UCERSS performs better than the UCERTSS in a multipath environment .

I. 서 론

센서 array의 출력으로부터 광대역 신호의 갯수 및 입사각을 추정하는 문제가 최근 활발히 연구되고 있다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁰⁾.

G. Su와 M. Morf는 다수의 광대역 신호의 입사각 추정을 위하여 MUSIC(Multiple Signal characterization) 알고리즘⁽²⁾⁽⁵⁾을 2차원으로 확장시킨 UCERSS(Unit Circle Eigendecomposition

*延世大學校 電子工學科
Dept. of Electronics, Yonsei University, Seoul
120 - 749, Korea.
論文番號 : 89 - 04 (接受 1988. 10. 6)

Rational Signal Subspace) 알고리즘을 제시하였다⁽¹⁾⁽³⁾.

UCERSS 알고리즘에서는 유리 함수(rational function)로 이루어진 신호의 벡터 공간을 구성한 후 spectral density 행렬을 단위원 상에서 eigendecomposition 함으로써 광대역 신호의 입사각을 추정하였다.

P 개의 광대역 신호가 서로 다른 방향에서 M 개의 센서로 이루어진 등간격 d의 선형 array이라고 가정하면, spectral density 행렬 \hat{Q}_l 은 단위원 상의 $2n+1$ 개의 보간점에서 T 개의 snapshot 벡터 $r(t)$ 로부터 계산된 covariance 행렬 \hat{R}_k 를 DFT (Discrete Fourier Transform) 하여 얻어진다⁽⁴⁾.

$$\hat{R}_k = \frac{1}{T-k} \sum_{t=k+1}^T r(t)r^T(t-k) \quad -n \leq k \leq n \quad (1)$$

$$\hat{Q}_l = \sum_{k=-n}^n w(k) \hat{R}_k \exp[-j2\pi \frac{kl}{2n+1}] \quad 0 \leq l \leq n \quad (2)$$

여기에서 T는 행렬의 transpose이고, $w(k)$ 는 해상도를 높이기 위해 사용되는 가중 함수(weighting function)이다.

UCERSS 알고리즘에서는 각 보간점에서 계산된 spectral density 행렬을 eigendecomposition 하여 고유치와 고유벡터를 얻은 신호 부분공간의 차원을 추정한 뒤 다음과 같이 공간 스펙트럼을 계산한다⁽⁵⁾.

$$P_u(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n f_i \|a_i^H(\theta) E_{ic}\|^2} \quad (3)$$

여기에서 H는 complex conjugate transpose이고, E_{ic} 는 잡음 부분공간을 형성하는 고유벡터를 열로 하는 행렬이고, β 가 array spacing 파라메타이고 $\tau = \frac{\beta l}{2n+1}$ 일때 전파 벡터 $a_i(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$a_i(\theta) = [1 e^{j\tau \sin \theta} \dots e^{j(M-1)\tau \sin \theta}] \quad (4)$$

λ_{ii} 가 신호 부분공간에 대응하는 고유치일때 $f_i > 0$ 은 다음과 같은 가중함수(weighting function)이다.

$$f_i = \begin{cases} \frac{1}{n} & \text{unweighted} \\ \sum_{i=1}^P \lambda_{ii} & \text{weighted} \end{cases} \quad (5)$$

Eigenstructure 분석을 이용하는 MUSIC, UCERSS 등의 알고리즘은 다경로인 경우 source 신호인 covariance 행렬이 singular 하므로 입사각 추정이 어려워진다⁽¹⁾⁽¹²⁾. 행렬의 singularity를 없애기 위해 공간 smoothing 방법이 광대역 신호에 대하여 적용되었고⁽⁴⁾⁽²⁰⁾, 적은 bias와 높은 해상도를 얻기 위해 신호 부분공간을 이용하는 알고리즘이 제안되었다⁽⁶⁾⁽²³⁾.

본 논문에서는 다경로에서 광대역 신호들이 입사하는 경우 UCERSS 알고리즘의 성능저하를 개선하기 위해 공간 smoothing 방법을 UCERSS에 적용한 SS-UCERSS(Spatially Smoothed UCERSS), 신호 부분공간을 이용하는 SSB-UCERSS (Signal Subspace Based UCERSS) 알고리즘을 제시하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 UCERSS 알고리즘과 제시된 알고리즘들의 성능을 비교하였다.

II. SS-UCERSS

등간격의 선형 array를 그림 1과 같이 M개의 센서로 이루어진 array를 subarray의 크기가 L인 N개의 subarray로 나누면 i번째의 subarray에서 받은 신호 벡터 $\underline{r}_i(t)$ 는 다음과 같이 주어지며

$$\underline{r}_i(t) = A D^{i-1} s(t) + n_i(t) \quad (6a)$$

$$D = \text{diag}[e^{-j\gamma_p}] \quad (6b)$$

$$\gamma_i = 2\pi\beta \sin \theta_i \quad 1 \leq i \leq P \quad (6c)$$

$$s^T(t) = [s_1(t) \dots s_P(t)] \quad (6d)$$

$$A = [a_1(\theta_1), \dots, a_P(\theta_P)] \quad (6e)$$

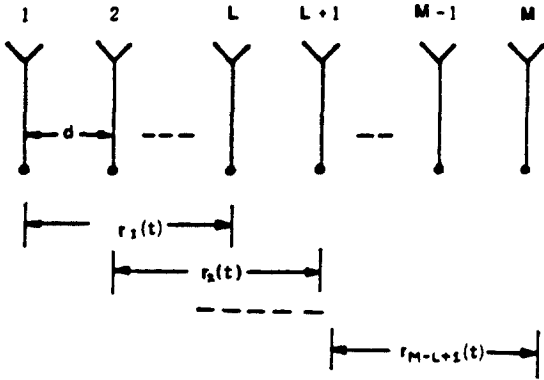


그림 1. 공간 smoothing을 위한 subarray subarray for spatial smoothing

신호 벡터 $r_1(t)$ 의 subarray covariance 행렬 R_{k1} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{k1} = AD^{l-1} S_k D^{M-l-1} A^H + \rho_w I \quad (7)$$

위에서 S_k 는 source의 covariance 행렬이다.

공간적으로 smoothing된 covariance 행렬은 subarray covariance 행렬의 평균으로 정의한다.⁽⁴⁾

$$\bar{R}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ki} \quad (8a)$$

식 (7), (8a)로부터

$$\begin{aligned} \bar{R}_k &= A \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D^{l-1} S_k D^{M-l-1} \right) A^H + \rho_w I \\ &= A \bar{S}_k A^H + \rho_w I \end{aligned} \quad (8b)$$

이고, \bar{S}_k 는 smoothing 된 source 신호의 covariance 행렬로 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{S}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D^{l-1} S_k D^{M-l-1} \quad (9)$$

$N \geq P$ 일때 smoothing 된 신호의 covariance 행렬

S_k 는 nonsingular 하다⁽⁴⁾.

SS UCERSS 알고리즘에서는 smoothing 된 covariance 행렬 \bar{R}_k 를 이용하여 식 (2)에 대응하는 spectral density 행렬을 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \bar{Q}_l &= \sum_{k=-n}^n w(k) \bar{R}_k \exp \left[-j2\pi \frac{kl}{2n+1} \right] \\ 0 &\leq l \leq n \end{aligned} \quad (10)$$

spectral density 행렬을 eigendecomposition 하여 잡음 부분공간을 형성하는 고유벡터를 열로 하는 행렬을 \bar{E}_{lc} 라 하면 식 (3)에 대응하는 공간스펙트럼을 다음과 같이 계산한다.

$$P_{ss}(\theta) = \frac{1}{\sum_{l=1}^n f_l \|a_l^H(\theta) \bar{E}_{lc}\|^2} \quad (11)$$

III. SSB-UCERSS

다경로시 협대역 신호에 대하여 신호 부분공간을 이용하는 알고리즘이 bias가 적고 해상도가 높다는 사실이 이미 밝혀졌다⁽⁶⁾.

본 논문에서는 광대역 신호에 대하여 신호 부분공간을 이용하는 SSB-UCERSS 알고리즘이 다경로시 우수한 성능을 갖는다는 사실을 다음과 같이 보였다.

잡음 부분공간을 형성하는 고유벡터를 Z 변환하면 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$\begin{aligned} T_{kl}(Z) &= \sum_{m=1}^M v_{kl}(m) Z^{-(m-1)} \\ &= Y_{kl}(Z) \prod_{m=1}^P [1 - \exp(-jw_m) Z^{-1}] \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서 v_{kl} 은 l 번째 spectral density 행렬의 k 번째 고유벡터의 m 번째 성분이며, $Y_{kl}(z)$ 는

M-P차의 Z 다항식, w_m 은 다음과 같이 주어진다.

$$w_m = 2\pi\beta \sin \theta_m \quad 1 \leq m \leq P \quad (13)$$

신호대잡음비가 10dB이고, coherent한 세 신호가 8개의 센서로 입사할 경우 3번의 독립 수행으로 얻은 다항식 $T_i(Z)$ 의 근을 복소평면에 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2.에서 근이 단위원의 내부에서 균일하게 분포하므로 공간 스펙트럼 추정시 신호의 존재가 확실히 나타나지 않음을 예상할 수 있다.

한편 신호 부분공간을 형성하는 고유벡터 $v_{k,i}$ 을 열로 하는 행렬을 $U_{k,i}$ 이라 하고, 이 행렬의 null 벡터⁽²⁵⁾를 $h_{k,i}$ 이라 하면 다음과 같은 homogeneous 행렬 방정식이 성립한다.

$$U_{k,i} h_{k,i} = 0 \quad (14)$$

여기에서 $U_{k,i}$ 은 다음과 같이 구성된 $(M-K+1) \times K$ 행렬이며 $h_{k,i}$ 은 $K \times 1$ 의 열 벡터이다. 편의상 $v_{k,i}(\cdot)$ 를 $v(\cdot)$ 로 표시한다.

$$U_{k,i} = \begin{bmatrix} v(K) & v(K-1) & \cdots & v(1) \\ v(K+1) & v(K) & \cdots & v(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v(M) & v(M-1) & \cdots & v(M-K+1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$h_{k,i}$ 을 구하기 위해 $U_{k,i}$ 의 내적(inner product) $F_{k,i}$ 을 eigendecomposition 한다⁽⁶⁾.

$$F_{k,i} = \sum_{l=1}^P U_{k,l} U_{k,l}^H \\ = \sum_{l=1}^P \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{M-K} v(i+K) v(i+K)^H \cdots \sum_{i=0}^{M-K} v(i+K) v(i+1)^H \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{M-K} v(i+1) v(i+K)^H \cdots \sum_{i=0}^{M-K} v(i+1) v(i+1)^H \end{bmatrix}$$

(16)

여기에서 P는 공간 상관 행렬의 실제 차원이며 K는 P 보다 크고 작은 선택적 파라메타이다. $F_{k,i}$ 을 eigendecomposition하여 얻은 영 고유치에 대응하는 고유벡터가 null 벡터 $h_{k,i}$ 이며 $h_{k,i}$ 을 식 (12)와 같이 Z-변환한 다항식의 근을 그림 2.의 경우와 같은 조건에서 구하여 복소 평면상에서 나타내면 그림 3.과 같다.

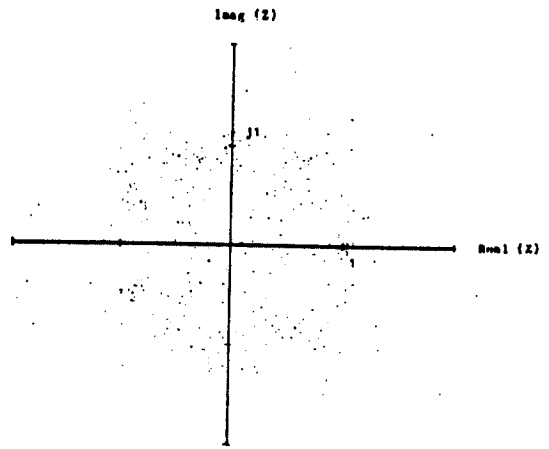


그림 2. 잡음 부분공간에 대한 근의 위치
Root locations for noise subspace

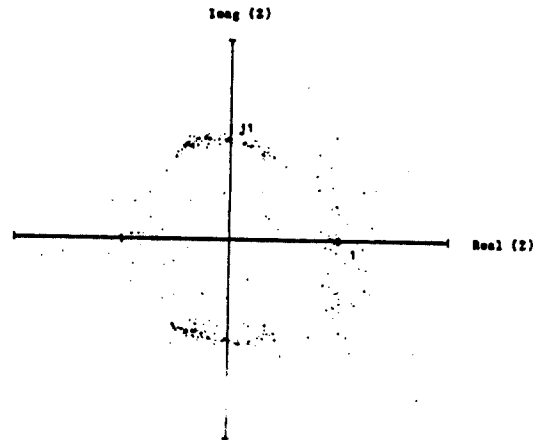


그림 3. 신호 부분공간의 null 공간에 대한 근의 위치
Root locations for nullspace of signal subspace

그림 3.에서 근이 단위원 상에서 집중되어 있으므로 신호의 존재가 확실히 나타날 수 있음을 예상할 수 있다. 신호 부분공간을 이용하는 방법에는 (a) 신호 부분공간을 직접 이용하는 방법⁽²⁰⁾. (b) 신호 부분공간의 null 공간을 이용하는 방법⁽⁶⁾이 있는데 본 논문에서 (a)와 (b) 방법을 UCERSS 알고리즘에 적용하여 SSB-UCERSS (Signal Subspace Based UCERSS) 알고리즘이라 한다.

<방법-1> 신호 부분공간을 직접 이용하는 방법 (SSB-UCERSS1)

신호 부분공간을 형성하는 고유벡터 \underline{y}_{ki} 을 열로 하는 행렬을 E_{mc} 라 하면 식 (17)과 같은 공간 스펙트럼을 계산한다⁽²⁰⁾.

$$P_{SSB1}(\theta) = \frac{1}{1 - \sum_{i=-n}^n f_i \| \underline{a}_i^H(\theta) E_{mc} \|^2} \quad (17)$$

분모의 두번째 항은 1 미만으로 정규화 되어 있고, 신호 부분공간의 차원은 입사 신호의 갯수가 아닌 source의 갯수이다.

<방법-2> 신호 부분공간의 null 공간을 이용하는 방법(SSB-UCERSS2)

신호 부분공간의 null 공간을 이용하는 알고리즘은 잡음 부분공간을 이용하는 알고리즘과 동일한 스펙트럼 추정식을 사용한다. \underline{F}_{ki} 의 영 고유치에 해당하는 고유벡터 \underline{h}_{ki} 을 열로 하는 행렬을 \tilde{E}_{ic} 라 하면 UCERSS와 같은 공간 스펙트럼 추정식을 사용한다.

$$P_{SSB2}(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=-n}^n f_i \| \underline{a}_i^H(\theta) \tilde{E}_{ic} \|^2} \quad (18)$$

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

UCERSS 알고리즘, SS-UCERSS, SSB-UCERSS 알고리즘의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을

통하여 비교하였다.

시뮬레이션에서 사용된 신호는 모두 같은 분산치를 갖고 신호대잡음비는 다음과 같이 정의된다.

$$SNR = 10 \log(\text{신호 분산의 합}) / (\text{잡음의 분산})$$

시뮬레이션에서의 조건은 400개의 snapshot 벡터, 20개의 lag($n=20$), 신호대잡음비가 0dB, spectral density 행렬을 구할때 Hamming window를 사용하였다. 샘플링 주파수에서 array spacing 파라메타는 5이며 공간 스펙트럼을 계산할때 weighting 을 하지 않았다. ($f_i=1/n$)

센서는 전방향(omnidirectional)으로 동일한 이득을 갖고, 주파수 특성이 평탄하며 선형 array는 등간격으로 분포되어 있다고 가정하고 백색 Gaussian 잡음을 다음과 같은 대역통과 필터에 통과 시킨 신호를 -10, 0, 10으로 지연시켜 사용하였다⁽¹⁾.

$$H(Z) = \frac{1}{1 + 0.371Z^{-1} + 0.36Z^{-2}}$$

공간 스펙트럼 추정시 $l=0$ 인 DC 성분의 spectral density 행렬은 전 방향 센서로 이루어진 array에 대하여 영향을 미치지 않으므로 계산에서 생략하였고, 모든 공간 스펙트럼은 다섯번의 독립 수행으로 얻은 결과를 겹쳐 보았다. UCERSS 알고리즘을 이용하면 그림 4.와 같이 입사각 추정에 실패함을 알 수 있다. 공간 상관 행렬의 singularity 를 없애는 SSB-UCERSS 알고리즘에서 subarray는 3개이고, 신호 부분공간의 차원이 3일때 그림 5.와 같이 세 개의 신호를 모두 추정하였지만 해상도가 낮다. SSB-UCERSS 알고리즘을 이용하여 그림 6., 7.과 같은 공간 스펙트럼을 얻는다. 이때 신호 부분공간의 차원은 1이며 SSB-UCERSS2에서 선택적 파라메타 K는 5이다.

그림 3.과 4.에서 예상한 바와같이 신호 부분공간을 이용하면 다경로시 입사각을 정확히 추정할 수 있고, SSB-UCERSS1 보다는 SSB-UCERSS2가 안정된 추정 결과를 보였다.

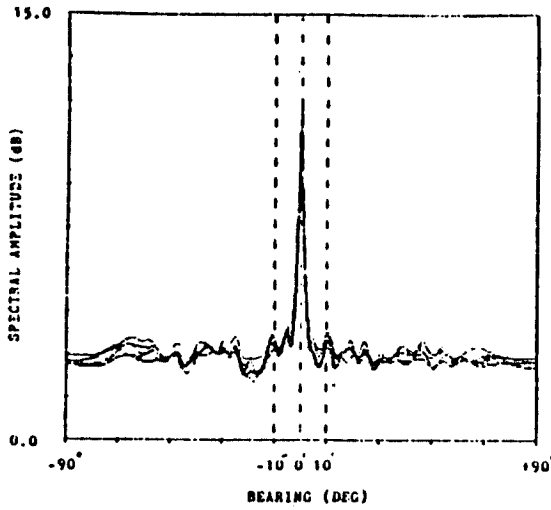


그림 4. UCERSS를 이용한 공간 스펙트럼
Spatial spectrum using UCERSS

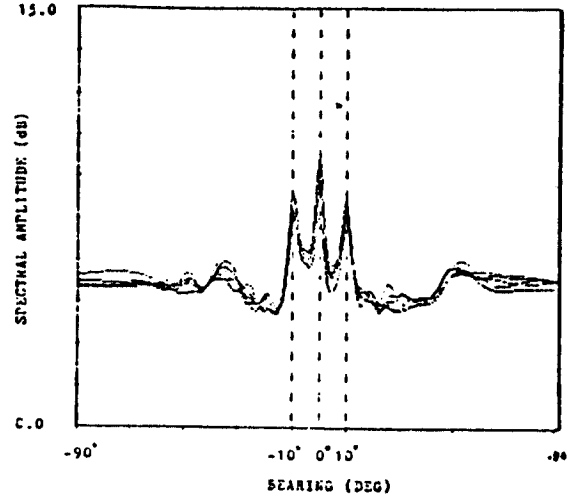


그림 5. SSB-UCERSS를 이용한 공간 스펙트럼
Spatial spectrum using SS-UCERSS

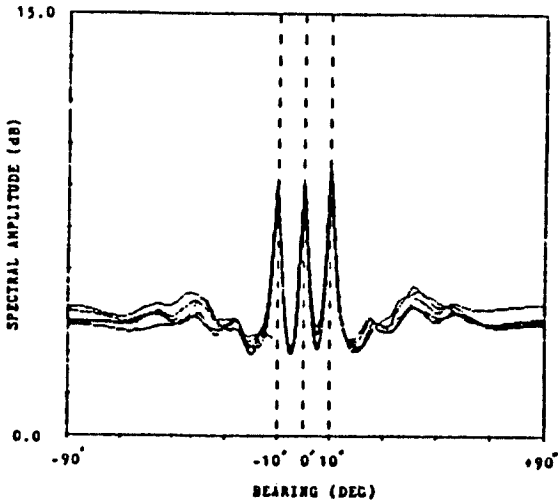


그림 6. SSB-UCERSS2를 이용한 공간 스펙트럼
Spatial spectrum using SSB-UCERSS2

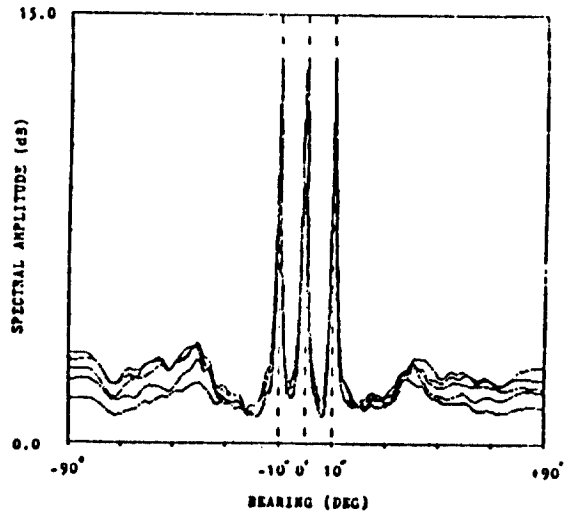


그림 7. SSB-UCERSS1를 이용한 공간 스펙트럼
Spatial spectrum using SSB-UCERSS1

V. 결 론

다경로시에 다수의 광대역 신호의 입사각을 추정하기 위해 UCERSS 알고리즘을 개선한 SS-UCERSS, SSB-UCERSS 알고리즘의 성능을

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 UCERSS 알고리즘의 성능과 비교하였다.

다경로 문제가 발생하면 UCERSS 알고리즘은 신호의 입사각을 추정하지 못한다. 행렬의 singularity를 없애기 위해 공간 smoothing 방법을

광대역으로 확장한 SS-UCERSS 알고리즘은 신호의 입사각을 추정할 수 있었으나 해상도가 낮았고, 신호 부분공간을 이용하는 SSB-UCERSS 알고리즘은 UCERSS, SSB-UCERSS보다 성능이 우수하였다.

신호의 벡터 공간을 이용하여 광대역 신호의 입사각을 추정하는 알고리즘은 계산량이 상당히 많은데 특히 SSB-UCERSS의 경우 UCERSS 알고리즘보다 두배의 eigendecomposition 계산을 필요로 한다.

參 考 文 獻

1. G. Su and M. Morf, "The Signal Subspace Approach for Multiple Wide-Band Emitter Location", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Proc. Vol. ASSP-31, No. 6, pp. 1502-1532, Dec. 1983.
2. R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-34, No. 3, pp. 276-280 Mar. 1986.
3. G. Su and M. Morf, "Model Decomposition Signal Subspace Algorithms", IEEE Trans. Acoust., Speech, 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, 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 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 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, Signal Proc., Vol. ASSP-34, No. 1., pp. 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 Signal Proc., Vol. ASSP-35, No. 10 pp. 1377-1385 Oct. 1987.
11. H. Wang and M. Kavch, "Coherent Signal Subspace Processing for the Detection and Estimation of Angles of Arrival of Multiple Wide-Band Sources, "IEEE Trans. Acoust., Speech, 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 Propagat., Vol. AP-14, No. 9, pp. 1069-1079 Sep. 1986.
13. A. K. Shaw and R. Kumaresan, "Estimation 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 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 Technique", 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, Signal Proc., Vol-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, 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. Inform. 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.

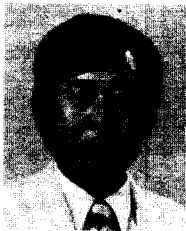
21. S. R. Degraaf and D. H. Johnson, "Capability of Array Processing Algorithms to Estimate Source Bearing", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Proc., Vol. ASSP-33, No. 6, pp. 1368-1379 Dec. 1985.
22. D. H. Johnson, "The Application of Spectral Estimation Methods to Bearing Estimation Problems", Proc. IEEE, Vol. 70, No. 9, pp. 1018-1028 Sept. 1982.
23. R. Kumaresan and D. W. Tufts, "Estimating the Angles of Arrivals of Multiple Plane Waves", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-19, No. 1, pp. 135-139 Jan. 1983.
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", 석사학위 논문, 연세대학교 대학원, 6월, 1988.
29. 조정권, 황영수, 차일환, 윤대회, "Wide Band ESPRIT 를 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.



趙正權(Jeong Kwon CHO) 正會員
1963年 5月22日生
1986年 2月: 延世大學校 電子工學科 卒業(工學士)
1988年 8月: 延世大學校 大學院 電子工學科 卒業(工學碩士)
1988年 9月~現在: 三星綜合技術院 電子機器研究所 研究1室



曹秉模(Byoung Mo CHO) 正會員
1958年 3月14日生
1982年 2月: 仁荷大學校 電子工學科 卒業(工學士)
1984年 8月: 延世大學校 大學院 電子工學科 卒業(工學碩士)
1985年 8月~現在: 延世大學校 大學院 電子工學科 博士課程



車日煥(Il Whan CHA) 正會員
1935年 12月25日生
1959年 2月: 延世大學校 電氣工學科(工學士)
1983年: 延世大學校 大學院 電子工學科(工學博士)
1969年~1970年: 英國University of Southampton Institute of Sound and Vibration 研究員



尹大熙(Dae Hee YOUN) 正會員
1951年 5月25日生
1977年 2月: 延世大學校 電子工學科 卒業(工學士)
1975年 5月: Department of Electrical Engineering, Kansas State University(M. S)
1982年 5月: Department of Electrical Engineering Kansas State University(Ph. D)

1986年 9月~1987年 7月: Department of Electrical and Computer Engineering, University of Iowa 客員教授
1973年~現在: 延世大學校 電子工學科 教授

1982年 8月~1985年 6月: Department of Electrical and Computer Engineering, University of Iowa 助教授
1985年 9月~現在: 延世大學校 電子工學科 助教授