

코히어런트 입사파의 도래방향 추정을 위한 공간평균법의 개선에 관한 연구

정 중 식*

*목포해양대학교 교수

A Study on Spatial Smoothing Technique for Angle of Arrival Estimation of Coherent Incoming Waves

Jung-Sik Jeong*

*Division of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 수신신호의 도래방향을 추정하는 기술은 어레이 안테나를 이용하는 무선통신시스템의 성능향상을 위하여 핵심역할을 수행하여 왔다. 이러한 기술중에서 MUSIC 및 ESPRIT와 같은 고분해 추정 알고리즘은 어레이 안테나에서 관측되는 수신신호의 데이터 벡터에 대한 공분산행렬을 계산한 후, 고유치 전개기법을 적용하여 도래방향을 정도 높게 추정한다. 그러나 이러한 고유치 전개기법에 기초를 둔 고분해 알고리즘은 멀티패스 환경에서 코히어런트 입사파 또는 상호간에 높은 상관관계를 가지는 수신신호들의 도래방향을 분리·추정하기가 어렵다. 이러한 경우에 종래의 방법은 사전 신호처리 과정으로서 공간평균법에 의한 공분산행렬을 계산한 후에 이를 이용하여 고유치 전개에 기초를 둔 고분해 알고리즘들을 적용하여 멀티패스 수신신호의 도래방향을 추정한다. 그러나 종래의 공간평균법이 어레이 안테나에 수신되는 신호에 대한 자기 공분산행렬의 대각요소를 포함하는 부분행렬들만을 사용하기 때문에 멀티패스파의 분리·추정을 가능하게 하는 대신에 안테나의 유효구경을 감소하는 결과를 초래한다. 또한 종래의 방법이 공분산행렬의 대각요소를 포함하는 부분행렬들만을 사용하고 대각요소를 포함하지 않은 상호상관 요소들에 대한 부분행렬은 고려하지 않음으로써 어레이 안테나에 의한 도래방향 추정성능을 저하시키는 요인이 된다. 따라서, 본 연구에서는 어레이 안테나에서 관측되는 수신신호 벡터의 자기상관행렬의 모든 요소들을 이용하는 새로운 공간평균법을 제안하고 종래의 공간평균법과 비교·평가한다.

핵심용어 : 코히어런트 신호, 도래방향, 공간평균법, 멀티패스파, MUSIC

Abstract : The techniques of estimating angle of arrival(AOA) have played a key role for enhancement of wireless communications using array antennas. Among those techniques, the superresolution algorithms, such as MUSIC and ESPRIT, calculate the covariance matrix of the array output vectors which are observed at the array antennas, and then by using eigen-decomposition of the covariance matrix, they estimate AOA of the received signals with high accuracy. However, superresolution algorithms based eigenvalue decomposition fails to estimate AOA under multipath environments. Under multipath environments, it is difficult to estimate AOA of the received signals due to coherency and high-correlation. To resolve coherent signals, the covariance matrix is calculated by using the conventional spatial smoothing technique, and then the techniques based on eigen-descomposition is applied. The result of the conventional spatial smoothing technique, however, is obtained at the cost of losing effective spatial aperture. Moreover, the conventional technique ignores any information in the cross-correlations of the array outputs the subarrays. As the result, the performance for AOA estimation is degraded. In this paper, we propose a new spatial smoothing technique, which consider the cross-correlation for subarrays. By computer simulation, the AOA estimation performance of the proposed method is compared with the conventional method and evaluated.

Key words : Coherent signal, AOA, Spatial smoothing, Multipath propagation, MUSIC

1. 서 론

육해상 이동통신 시스템을 포함하여 레이더 신호처리 분야 등 어레이 안테나에 의한 도래방향 추정기술은 어레이 안테나의 공간적인 신호처리 능력을 활용하여 무선통신 시스템의 성능을 향상시키기 위한 중요한 역할을 수행하여 왔다(Chen, et al., 2002), (Krim et al., 1996). 최근에는 해상분야에서 접이안

선박들의 안전성을 확보하기 위한 사전연구로서 해안의 장주기파에 대한 파향 추정방법으로 도래방향 추정 알고리즘을 이용한 실험도 행해지고 있다(Yoo et al., 2003). 어레이 안테나에 수신되는 신호의 도래방향을 정도 높게 추정하기 위한 고분해 알고리즘들로는 종래부터 Capon법 (Capon, 1969), 최대엔트로피법 (Gabriel, 1980)과 고유치 분해에 기초를 둔 MUSIC (Schmidt, 1986) 및 ESPRIT (Roy et al., 1989)와 같

* 대표저자 : 정중식(중신회원), jsjeong@mmu.ac.kr 061) 240-7238

은 방법들이 알려져 있다. 고유치 분해에 기초를 두고 있는 고분해 도래방향 추정 알고리즘들은 어레이 안테나에서 관측되는 수신신호 벡터에 대한 공분산 행렬의 고유치 분해를 통하여 신호공간과 잡음공간을 분리함으로써 도래방향을 추정한다. 그러나 이러한 알고리즘은 복수개의 수신신호가 멀티패스 환경에 의하여 높은 상관관계를 가지거나 완전상관 관계(코히어런트)를 이루게 될 때 도래방향을 분리·추정하는데 실패한다. 실제로 멀티패스 진파는 해면으로부터 반사된 신호가 선박에 탑재된 안테나에 수신되거나 이동국과 기지국 사이에 존재하는 장애물에 의하여 직접파와 간접파가 동시에 수신될 때 흔히 발생하는 문제이기도 하다.

멀티패스 환경에서 도래방향을 추정하기 위한 기술로서는 전방이동 공간평균법 (Shan et al., 1985) 및 전·후방 공간평균법(Williams et al., 1988 ; Pillai et al., 1989)과 같은 몇가지 방법들이 이미 사용되어 왔다. 그러나 종래의 공간평균법은 전체 어레이 소자들을 복수개의 부분어레이 소자들로 나누어 수신된 신호벡터의 공분산행렬을 평균하기 때문에 멀티패스 문제를 해결하는 대신에 어레이 안테나의 유효구경을 감소시키는 결과를 초래하였다. 게다가 종래의 방법에서는 어레이 출력신호에 대한 공분산행렬의 주대각선 요소를 제외하는 부분행렬에 포함될 수 있는 상호 상관요소들을 고려하지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 종래의 공간평균법에서 고려하지 못했던 공분산 행렬의 상호상관 요소들에 대한 정보를 포함하는 수정된 공간평균법을 제안하고 수치시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 완전상관 관계를 가지는 다중신호에 대한 도래방향 추정성능을 평가한다.

제 2장과 제 3장에서는 각각 어레이 안테나에 수신되는 신호모델과 종래에 이용되어 온 공간평균법을 기술하고, 제 4장에서는 제안된 공간평균법을 이용하여 공분산행렬을 추정하는 방법을 설명한 후, 제 5장에서는 고분해 알고리즘으로 대표적인 MUSIC 알고리즘에 적용하는 방법을 설명하였다. 제 6장에서는 제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 수치시뮬레이션을 통하여 도래방향을 추정하였다. 또한, 그 추정 결과를 종래의 공간평균법에 의한 방법과 비교·평가하고 제 7장에서 결론을 기술한다.

2. 멀티패스 환경에서 수신신호 모델

임의의 방향적 특성을 지니고 p 개의 소자로 구성된 균일한 직선형 어레이 안테나를 가정하자. 이때 q ($q < p$) 개의 협대역 평면파 $s_i(t)$ ($i=1,2,\dots,q$)가 어레이 안테나에 수신된다고 할 때, 어레이 안테나에서 관측된 출력신호벡터, $x(t) \in C^{p \times 1}$ 은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^q \alpha(\theta_i) s_i(t) + n(t) \quad (1)$$

여기서, $\alpha(\theta_i) \in C^{p \times 1}$ 는 i 번째 수신신호의 도래방향 θ_i 에 대한 어레이 응답벡터로 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\alpha(\theta_i) = [e^{-j\omega_0 \tau_i}, \dots, e^{-j\omega_0(p-1)\tau_i}]^T \quad (2)$$

여기서, $\tau_i = \frac{d}{c} \sin \theta_i$, ω_0 는 중심주파수, d 는 어레이 소자 사이의 간격, c 는 전파속도를 나타낸다. 식(1)을 벡터와 행렬을 이용하여 다시 표현하면 식 (3)과 같이 단순화할 수 있다.

$$x(t) = A s(t) + n(t) \quad (3)$$

여기서, 행렬 A 는 $A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_q)] \in C^{p \times q}$ 이며, A 의 각 열벡터들은 선형적으로 독립인 Vandermonde 구조를 지닌 Full column rank로 된다. 한편, 벡터 $s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_q(t)]^T \in C^{q \times 1}$ 이고, $n(t)$ 는 부가적 잡음벡터이며 백색잡음이라고 가정한다. 수신신호가 상호 무상관이고, 잡음신호와 수신신호도 상호 무상관이라고 가정하면, 어레이 안테나에서 관측된 수신신호 벡터의 앙상블 평균 공분산 행렬은 식 (4)와 같이 주어진다.

$$R = E[x(t)x^{\dagger}(t)] = AR_s A^{\dagger} + \sigma_n^2 I \quad (4)$$

여기서, $(\cdot)^{\dagger}$ 는 Hermitian 전치행렬, $E[\cdot]$ 는 기대치, $R_s = E[s(t)s^{\dagger}(t)] \in C^{q \times q}$ 는 수신신호벡터의 공분산행렬, $I \in R^{p \times p}$ 는 단위행렬, σ_n^2 은 잡음의 분산값을 나타낸다. 이 경우에 q 개의 신호들이 수신될 때 상호 무상관이거나 부분상관 관계를 지닐 때에만 R_s 는 정칙행렬(regular matrix)이 되며 고유치 분해에 기초한 MUSIC과 ESPRIT와 같은 알고리즘을 적용함으로써 수신신호의 도래방향을 분리·추정할 수 있다.

그러나 수신된 신호들이 완전 상관관계를 가진 코히어런트 신호라고 가정하면 R_s 는 특이행렬이 된다. 코히어런트 신호는 Fig. 1과 같은 멀티패스 환경하에서 직접파와 간접파의 수신에 의하여 발생한다.

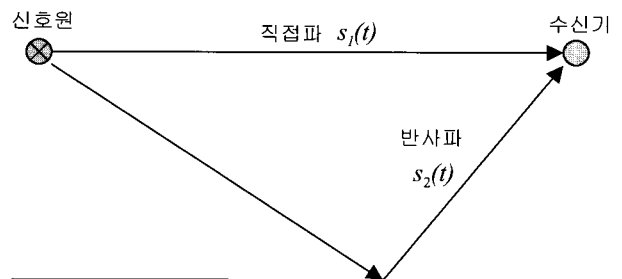


Fig. 1 A simple multipath environment

두개의 코히어런트 신호를 가정하면 $s_2(t) = \alpha s_1(t)$ 라는 관계가 성립한다. 여기서 α 는 두 개의 코히어런트 신호사이의 진폭과 위상관계를 설명하는 복소 스칼라 량으로 정의된다. 이 경우의 신호벡터 $s(t)$ 와 A 는 각각,

$$s(t) = [(1 + \alpha)s_1(t), s_3(t), \dots, s_q(t)]^T \quad (5a)$$

$$A = [a(\theta_1) + \alpha a(\theta_2), a(\theta_3), \dots, a(\theta_q)] \quad (5b)$$

로 된다. 따라서 A 의 첫번째 열벡터는 합당한 어레이 응답 벡터가 될 수 없고, 식 (3)에서와 같은 Vandermonde 구조가 아니다. 결과적으로 고유치 분해에 기초를 둔 초고분해 알고리즘을 적용할 때 도래방향 θ_1 과 θ_2 는 추정 불가능하며, $\{\theta_3, \theta_4, \dots, \theta_q\}$ 만이 추정가능한 상태로 남는다.

3. 공간평균법

m 개의 소자를 지닌 직선형 어레이 안테나에 q 개의 코히어런트 신호가 수신된다고 가정하자. 이 직선형 어레이 안테나를 각각 p ($p \geq q + 1$)개의 안테나 소자를 지니고 중복된 L 개의 부분어레이로 나눈다. 즉, 첫 번째 부분어레이는 $\{1, 2, \dots, p\}$, 두 번째 부분어레이는 $\{2, 3, \dots, p + 1\}$ 등과 같이 구성된다. 이 경우 i ($i = 1, 2, \dots, L$)번째와 j ($j = 1, 2, \dots, L$)번째 부분어레이의 상호 상관행렬(cross correlation matrix)은 식 (6)과 같이 주어진다.

$$R_p^{ij} = A_p D^{i-1} R_s (D^{j-1})^H A_p^H + \sigma^2 I \quad (6)$$

여기서, A_p 는 첫 번째 부분어레이에 대한 $p \times q$ 어레이 응답행렬이며, D 는 식 (7)과 같이 $q \times q$ 대각행렬이다.

$$D = \text{diag}[e^{-j\omega_0\tau_1}, e^{-j\omega_0\tau_2}, \dots, e^{-j\omega_0\tau_q}] \quad (7)$$

다음에 후방 공간평균법을 적용하기 위하여 첫 번째 부분어레이를 $\{m, m - 1, \dots, m - p + 1\}$ 두 번째 부분어레이를 $\{m - 1, \dots, m - p\}$ 등으로 나눈 후, i 번째와 j 번째 부분어레이에 대한 상호 상관행렬을 구하면

$$\overline{R}_p^{ij} = \mathcal{J}(R_p^{ij})^* J \quad (8)$$

이 된다. 여기서, $(\cdot)^*$ 는 복소공액을 나타내며 \mathcal{J} 는 다음과 같은 $p \times p$ 교환행렬의 구조를 가진다.

$$J = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

전방 및 전후방 공간평균법은 다음과 같이 각각 L 개의 부분어레이들 전체에 대한 평균 자기 상관행렬을 구함으로써 얻어진다.

$$\overline{R}_f = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L R_p^{ii} \quad (9)$$

$$\overline{R}_{fb} = \frac{1}{2L} \sum_{i=1}^L [R_p^{ii} + \overline{R}_p^{ii}] \quad (10)$$

식 (9)는 전방 공간평균법에 의한 결과를, 식 (10)은 식 (9)의 단순한 확장으로써 전후방 공간평균법에 의한 결과를 나타낸다. 결과적으로 종래의 공간평균법은 식 (9) 또는 식 (10)의 각 개별 부분어레이에 대한 공분산행렬을 계산한 후, 고유치 분해에 기초를 둔 알고리즘을 적용함으로써 도래방향을 추정할 수 있었다. 이 경우, 식 (9)의 \overline{R}_f 보다는 식 (10)의 \overline{R}_{fb} 를 도래방향 추정에 이용할 경우 더 좋은 결과치 얻을 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다(Williams et. al., 1988 ; Pillai et al., 1989).

4. 수정된 공간평균법

식 (9)와 식 (10)에서 알 수 있듯이 종래의 공간평균법은 부분어레이에 대한 공분산행렬, R_p^{ij} ($i \neq j$)와 \overline{R}_p^{ij} ($i \neq j$)를 무시하고 있기 때문에 m 개의 소자를 지닌 어레이 안테나 전체에 대한 공분산행렬의 요소들 중에서 상호상관 요소들에 대한 일부분의 정보를 잃게 되며 부분어레이의 크기가 적을수록 더 많은 정보를 잃어 버리는 결과를 초래한다. 이 문제를 해결하기 위하여 모든 부분어레이에 대한 공분산 행렬을 고려하여 공간평균법을 적용한다. Fig. 2는 $m \times m$ 크기의 공분산 행렬을 도식화 한 것이다. 작은 사각형으로 둘러싸인 부분은 p 개의 부분어레이 관측벡터에 대하여 계산된 $p \times p$ 크기의 공분산 행렬, 즉, R_p^{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, L$)을 표시한다. Fig. 2에서 종래 공간평균법에서 이용되어 온 공분산 행렬, R_p^{ii} 는 주 대각선을 중심으로 구성되며 음영이 들어간 사각형 박스로 표시하였다. Fig. 2에서 모든 공분산행렬, 즉, R_p^{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, L$)들 상호간의 승적한 결과들을 대수적으로 합하여 평균화 하면 식 (11)과 식 (12)와 같이 새로운 행렬, \widehat{R}_f 와 \widehat{R}_{fb} 를 계산할 수 있다.

$$\widehat{R}_f = \frac{1}{L^2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L R_p^{ij} R_p^{ji} \quad (11)$$

$$\widehat{R}_{fb} = \frac{1}{2L^2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L [R_p^{ij} R_p^{ji} + \overline{R}_p^{ij} \overline{R}_p^{ji}] \quad (12)$$

결국, 식 (11)과 식 (12)의 \widehat{R}_f 및 \widehat{R}_{fb} 는 어레이 안테나에서 관측된 벡터의 제 4차 모멘트(the 4th order moments)에 해당하는 \widehat{R}_f 및 \widehat{R}_{fb} 의 구조로부터 알 수 있는 것처럼 Fig. 2에 나타난 모든 부분어레이에 대한 공분산 행렬을 고려하고 있다는 점과 공분산 행렬 상호간의 곱차 통계치를 계산하여 이를 평

균화하였다 점은 주목할 만한 일이다. 종래의 방법의 경우에는 식 (9) 및 식 (10)에 나타난 것 처럼 $i = j$ 일때 구성되는 R_p^{ii} 또는 \overline{R}_p^{ii} 의 대수적인 합의 평균치인 \widetilde{R}_f 및 \widetilde{R}_{fb} 를 가지고 도래방향을 추정하는 고분해 알고리즘에 적용할 수 있다.

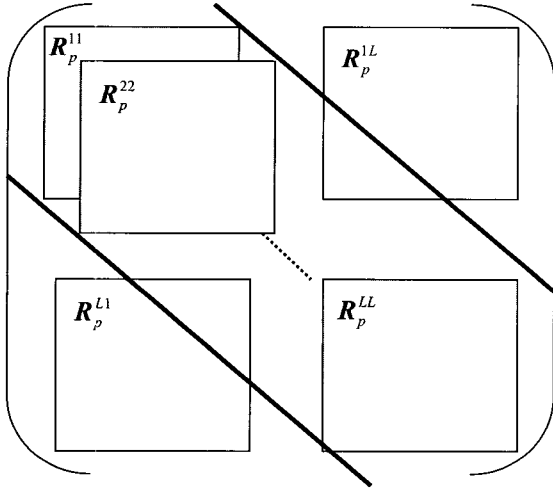


Fig. 2 Structure of subarrays

5. MUSIC 알고리즘의 적용

제 4장에서 제안한 방법을 MUSIC 알고리즘에 적용하기 위하여 식 (11)과 식 (12)에서 계산된 행렬, \overline{R}_f 또는 \overline{R}_{fb} 의 고유치 전개를 하여야 한다. 여기에서는 논의를 간단히 하기 위하여 \overline{R}_{fb} 를 이용한다. \overline{R}_{fb} 의 고유치를 전개하면 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{R}_{fb} = \sum_{i=1}^p \lambda_i e_i e_i^\dagger \quad (13)$$

여기서, $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 는 \overline{R}_{fb} 의 p 개의 고유치를 크기의 순서대로 나타내며, $e_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 는 p 개의 고유치 λ_i 에 대응하는 p 차원 고유벡터를 나타낸다. p 개의 고유벡터 중에서 가장 작은 $(p - q)$ 개의 고유치 $\lambda_i (i = q + 1, q + 2, \dots, p)$ 에 대응하는 고유벡터를 이용하면 식 (14)와 같은 θ 의 함수로서 $a(\theta)$ 에 대한 비용함수(cost function)를 세울 수 있다.

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{a^\dagger(\theta) E_N E_N^\dagger a(\theta)} \quad (14)$$

여기에서 $E_N = [e_{q+1}, e_{q+2}, \dots, e_p] \in C^{p \times (p - q)}$ 표시되는 행렬이다. 따라서 수신신호가 도래할 것으로 생각되는 모든 θ 값에 대하여 식 (14)를 계산하였을 때 피크값을 나타내는 $P_{MU}(\theta)$ 에 대응하는 θ 값이 신호의 도래방향이 된다.

6. 모의실험

제 4절에서 제안한 방법의 유효성을 예시하기 위하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서는 상기의 식 (12)를 이용하여 고유치 분해에 기초를 둔 MUSIC 알고리즘을 적용하여 도래방향을 추정하고 식 (10)을 이용한 결과와 비교하고자 한다. 먼저 제안된 공간평균법을 이용하여 수신신호를 먼저 선처리한 후에 MUSIC 알고리즘을 이용하여 후처리함으로써 도래방향 추정결과를 표시하였다. 또한 제안된 방법의 유효성을 보여주기 위하여 종래의 전후방 공간평균법과 비교·평가하였다. 시뮬레이션에서는 6개의 소자를 반파장 간격으로 배열한 직선형 어레이 안테나를 이용하였다. 각 부분어레이의 소자수는 4개로 하였다. 먼저 SNR(Signal-to-Noise Ratio)가 10[dB]인 두 개의 코히어런트 신호가 87° 와 93° 로부터 입사하고 있으며 127개의 샘플데이터를 수집하였다. Fig. 3은 종래의 전후방 공간평균법과 본 논문에서 제안하는 수정된 공간평균법을 이용하여 추정한 결과를 보여준다. 수직축은 MUSIC 스펙트럼의 최대값에 대하여 상대적인 결과값을 dB값으로 나타내고 있다. 종래의 방법은 제안된 방법처럼 두 개의 입사신호를 정확하게 분리·추정가능함을 보여준다. Fig. 4에서는 두 개의 입사신호의 도래방향이 88° 와 92° 로 Fig. 3의 경우보다 더욱 근접하여 수신되고 있으며 입사신호의 SNR도 3[dB]로 Fig. 3의 경우보다 더욱 낮아진 상황을 가정하였다.

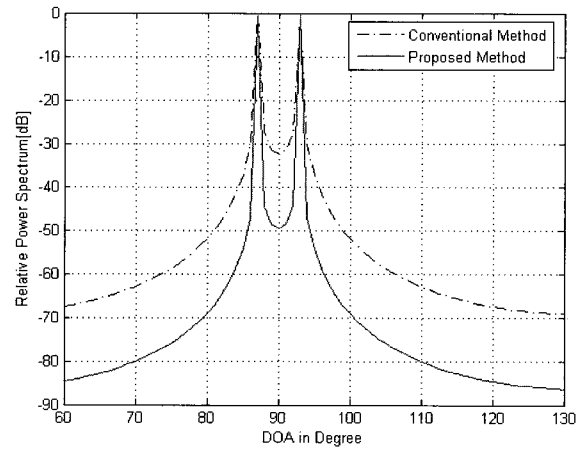


Fig. 3 AOA estimates of two coherent signals, which were obtained by using the conventional spatial smoothing technique and the proposed method. The two coherent signals have equal powers, SNR=10[dB].

시뮬레이션의 결과로부터 종래의 방법이 도래방향을 분리·추정하는데 실패하고 있는 반면에 제안된 방법은 낮은 SNR 상황에서 근접되어 수신하는 신호의 경우에도 좋은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 5에서는 88° , 92° 및 95° 로부터 3개의 코히어런트 입사파가 수신되는 경우를

가정하였다. 각 입사신호의 SNR은 각각 3[dB], 5[dB], 8[dB]이다. 이 경우에 종래의 방법이 92° 및 95° 방향으로부터 수신되는 입사신호는 분리·추정가능 하지만 88° 방향으로부터 수신되는 신호는 추정하는데 실패하였다. 이처럼 제한된 방법이 종래의 방법보다 좋은 추정성능을 나타내고 있는 점은 제 4장에서 언급한 것처럼 전체 어레이 안테나에서 관측된 수신신호 벡터에 대한 공분산행렬의 모든 요소들을 고려하고 있다는 점과, 부분어레이에 대한 공분산 행렬 상호간의 상호상관을 고려한 결과에 의한 것이다.

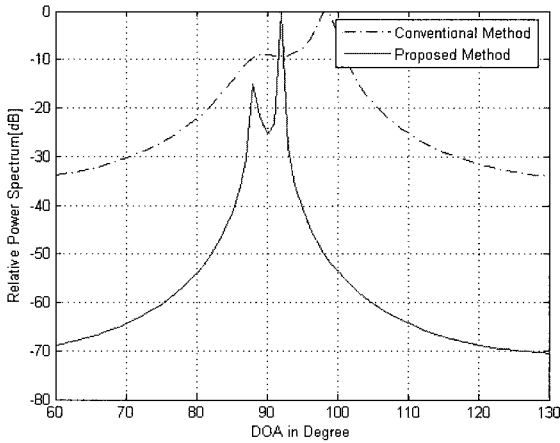


Fig. 4 AOA estimates of two closed coherent signals, which were obtained by using the conventional spatial smoothing technique. The two coherent signals have equal powers, SNR=3[dB]

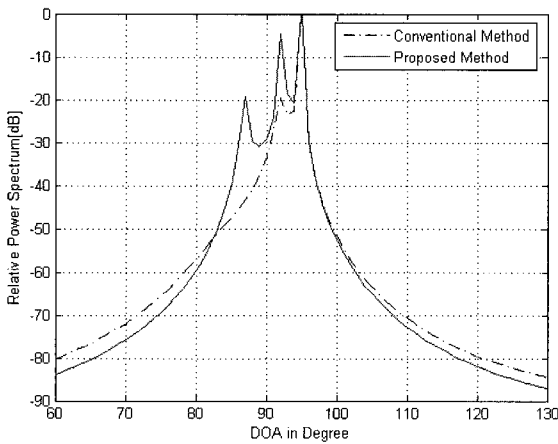


Fig. 5 AOA estimates of two closed coherent signals, which were obtained by using the conventional spatial smoothing technique. The SNRs of three coherent signals were 3, 5, and 8[dB], respectively.

7. 결 론

본 논문에서는 해상에서 흔히 발생하는 멀티패스 환경에 의하여 높은 상관관계를 가지거나 완전상관관계를 가지는 복

수개의 코히어런트 신호가 입사할 때 도래방향을 추정가능하게 하는 수정된 공간평균법을 제안하였다. 종래의 공간평균법은 주대각 요소들 중심으로 하는 부분어레이 소자들에 대한 공분산행렬의 평균치를 이용하기 때문에 어레이 안테나 소자 전체에 대한 공분산행렬의 요소들 중 수신신호의 상호상관을 나타내는 요소들의 일부분을 고려하지 않는다는 문제점이 있었다. 이러한 결과는 종래의 공간평균법에 대한 성능을 제한하는 요소 중의 하나였다. 그러나, 본 논문에서 제안하는 방법은 어레이 소자 전체에 대응하는 공분산행렬의 모든 상호요소들을 고려하였기 때문에 공간평균법의 이용 대가로 발생하는 안테나 유효구경의 감소를 보상할 수 있었고, 그 결과로써 도래방향 추정성능도 높일 수 있었다. 본 논문의 연구결과는 이동 무선통신 시스템의 성능향상 뿐만 아니라, 멀티패스 환경에서 레이더 신호처리 성능향상을 위하여 어레이 안테나의 공분산행렬을 적용하는 알고리즘에 유효하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Chen, J.C, Kung Yao, Hudson, R.E. (2002), "Source localization and beamforming," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 19, Issue. 2, pp. 30-39.
- [2] H. Krim and M. Viberg (1996), "Two decades of array signal processing research," *IEEE Signal Processing*, pp. 67-94.
- [3] J.Capon(1969), "High resolution frequency wavenumber spectrum analysis," *Proc. IEEE*, Vol. 57, pp. 1408-1418.
- [4] Ronald T. Williams, Surendra Prasad, A.K.Mahalanabis, and Leon H.Sibul (1988), "An improved spatial smoothing technique for bearing estimation in a multipath environment," *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 36, No. 4, pp. 425-432.
- [5] R. O. Schmidt (1986), "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, Vol. AP-34, No. 3, pp. 276-280.
- [6] R.Roy and T.Kailath (1989), "ESPRIT estimation of signal parameters via rotational invariance techniques," *IEEE Trans. Acoust. Speech & Signal Process.*, Vol. 37, No. 7, pp. 984-995.
- [7] S. Unnikrishna Pillai and Byung Ho Kwon(1989), "Forward/Backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification," *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 37, No. 1, pp. 8-15.
- [8] Titus K.Y.Lo, Henry Leung, John Litva (1994), "Artificial neural network for AOA estimation in a multipath environment over the sea," *IEEE Journal of Ocean Eng.*, Vol. 19, No. 4, Oct. 1994, pp. 555-561.

- [9] Tie-Jun Shan, Mati Wax, and Thomas Kailath (1985), "On spatial smoothing for direction of arrival estimation of coherent signals," IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. ASSP-33, No. 4, pp. 806-811.
- [10] W.F.Gabriel (1980), "Spectral analysis and adaptive array superresolution techniques," Proc. IEEE, Vol. 68, pp. 654-666.
- [11] Yun-Ja Yoo, Chae-Uk Song, Hidenobu Fujii, Kouguchi Nobuyoshi (2003), "Basic Study on Long Period Gravity Wave Observation System Using MUSIC Method with GPS Arrayed Antenna Buoys," Proceedings of Korean Institute of Navigation and Port Research, Vol. 27, No. 2, pp. 225-229.

원고접수일 : 2004년 12월 29일

원고채택일 : 2005년 4월 28일