

# 개선된 ESPRIT 알고리즘의 성능분석

정희원 정철곤\*, 김종규\*

## Performance Analysis of Modified ESPRIT Algorithm

Cheol-kon Jung\*, Joong-kyu Kim\* *Regular Members*

### 요약

도래각 추정을 위한 대표적인 알고리즘으로 고유치 분해방식을 이용한 ESPRIT 알고리즘이 있다. 이 알고리즘은 다중 신호의 도래각을 추정할 수 있을 뿐만 아니라, 낮은 SNR 에서도 뛰어난 분해능을 가지고 있다. 이러한 뛰어난 추정 능력에도 불구하고, ESPRIT 알고리즘은 서로 주파수와 위상이 같은 coherent한 신호를 분해하지 못하는 커다란 결점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 결점을 보완한 개선된 ESPRIT (Modified ESPRIT) 알고리즘을 제안한다. 개선된 ESPRIT 알고리즘은 기존의 ESPRIT에 spatial smoothing 방법을 도입하여 구성되어진다. 모의실험결과 개선된 ESPRIT 알고리즘은 coherent하게 입사하는 신호의 도래각을 분해하는 능력에 있어서 매우 우수한 성능을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

### ABSTRACT

A typical algorithm being applied in the DOA(direction of arrival) estimation is the ESPRIT(estimation of signal parameters by rotational invariance techniques) algorithm based on eigendecomposition method. The ESPRIT algorithm can estimate the DOA of each signal in multi-signal sources environment and has a fine resolution in low SNR. In spite of the fine estimation capability, the main drawback of ESPRIT algorithm is that it cannot separate the DOA of coherent signals which have the same frequency and phase, due to the inherent deficiency of eigendecomposition method. We propose an alternative technique called Modified ESPRIT algorithm in order to improve the resolution among coherent signals. The Modified ESPRIT algorithm is constituted by combining spatial smoothing method and the conventional ESPRIT. We show some simulation results to demonstrate the superiority of this proposed method to the conventional ESPRIT algorithm in performance under both coherent and incoherent signal environments.

### I. 서론

배열 안테나 시스템(array antenna system)을 이용한 신호의 도래각 추정(DOA estimation) 방법은 지진학(seismography), 수중 음파 탐지(sonar), 레이더(radar) 신호처리 등 여러 분야에서 신호의 근원지를 파악하는데 이용되고 있다. 최근 들어 다중신호(multiple signals)가 수신기에 입사할 경우 각 신호의 도래각(Direction of arrival)을 분리해 내는 알고리즘이 활발히 진행되고 있다. 이러한 알고리즘을

초 분해능 도래각 추정 알고리즘(superresolution algorithm for estimation direction of arrivals of signals)이라고 한다. 초 분해능 알고리즘은 공통적으로 스펙트럼 추정 방식(spectral estimation method)에 기초를 두고 있다. 대표적인 알고리즘으로는 J. Capon의 MLM(maximum likelihood method)<sup>[1]</sup>, J.P.Burg의 MEM(maximum entropy method)<sup>[2]</sup>, R.O.Schmidt의 MUSIC(multiple signal classification) method<sup>[3]</sup>, 그리고 R.Roy의 ESPRIT (estimation of signal parameters by rotational invariance techniques) method<sup>[4]</sup> 등이 있으며, 이들

\* 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 (jkkim@yurim.skku.ac.kr)  
논문번호 : 00408-1023, 접수일자 : 2000년 10월 23일

중에서 고유치 분해방식을 이용한 ESPRIT 알고리즘이 성능면에서 가장 우수한 것으로 알려져 있다<sup>[5]</sup>. 고유치 분해방식은 표적 신호에 의한 고유벡터와 잡음신호에 의한 고유벡터가 서로 직교한다는 성질을 이용하여 방위각을 추정하는 방식으로 그 분해능이 매우 뛰어나다<sup>[6]</sup>. 그러나 뛰어난 추정능력에도 불구하고, 서로 주파수와 위상이 같은 coherent한 신호에 대해서는 분해능이 현저히 떨어지는 커다란 결점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 결점을 효율적으로 해결하기 위해 spatial smoothing 기법을 도입하여 개선된 ESPRIT을 제안하고, incoherent한 신호와 coherent한 신호에 대하여 기존의 알고리즘과 비교하여 성능을 분석하였다. 모의 실험 결과 개선된 ESPRIT은 coherent한 신호에 대해서 뛰어난 분해성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

## II. 본 론

### 1. ESPRIT(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) 알고리즘<sup>(7)(8)</sup>

그림 1과 같이  $d$ 개의 표적으로부터 발생한 신호  $\{s_k(t), k=1, \dots, d\}$ 가  $m$ 개의 수신기로 구성된 동간격 선어레이에 도달한다고 하자. 각 수신기는  $X$ 와  $Y$  부어레이를 갖는 doublet의 형태로 되어 있으며, 이때 표적신호는 평면파(plane wave)의 형태로서,  $i$ 번째 수신기에 입사되는 신호는 (1a) (1b)식과 같이 위상지연된 표적신호성분과 잡음신호성분의 합으로 표현된다.

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^d s_k(t) a_i(\theta_k) + n_{x,i}(t) \quad (1a)$$

$$y_i(t) = \sum_{k=1}^d s_k(t) e^{jw_0 \delta \sin \theta_k / c} a_i(\theta_k) + n_{y,i}(t) \quad (1b)$$

여기서  $s_k(t)$ 는 관측시간  $t$ 에서의  $k$ 번째 표적신호이다. 또한  $w_0$ 는 표적신호의 중심주파수이고,  $\delta$ 는 부수신기사이의 거리이며,  $\theta_k$ 는  $k$ 번째 표적신호의 도래각이고  $c$ 는 신호의 전송속도이다.  $a_i(\theta_k)$ 는  $i$ 번째 수신기에 입사되는  $k$ 번째 표적 신호의 방향 모드벡터(direction mode vector)이고, 잡음  $n_{x,i}(t)$ ,  $n_{y,i}(t)$ 는 평균이 0이고, 분산이  $\sigma^2$ 인 첨가 백색 가우시안 잡음(additive white gaussian noise)으로서,

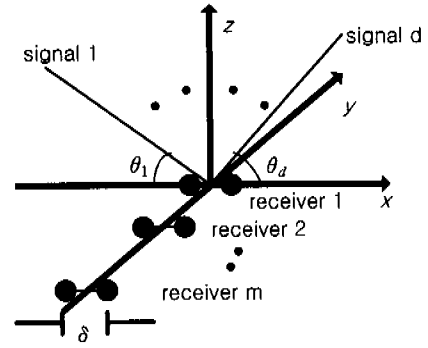


그림 1. 신호모델

표적신호성분과는 서로 상관성이 없다고 (uncorrelated) 가정한다. (1a) (1b)식을 벡터형태로 나타내면 다음과 같다.

$$x(t) = A s(t) + n_x(t) \quad (2a)$$

$$y(t) = A \Phi s(t) + n_y(t) \quad (2a)$$

여기서 수신신호벡터  $x(t)$ ,  $y(t)$ , 방향모드벡터  $A$ , 위상지연벡터  $\Phi$ , 표적신호벡터  $s(t)$ , 그리고 잡음벡터  $n_x(t)$ ,  $n_y(t)$ 는 각각 같이 표시할 수 있다.

$$x(t) = [ x_1(t) \dots x_m(t) ]^T \quad (2c)$$

$$y(t) = [ y_1(t) \dots y_m(t) ]^T \quad (2d)$$

$$A = [ a(\theta_1) a(\theta_2) \dots a(\theta_d) ] \quad (2e)$$

$$s(t) = [ s_1(t) \dots s_d(t) ]^T \quad (2f)$$

$$\Phi = \text{diag}[ e^{jw_0 \delta \sin \theta_1 / c} \dots e^{jw_0 \delta \sin \theta_d / c} ] \quad (2g)$$

$$n_x(t) = [ n_{x1}(t) \dots n_{xm}(t) ]^T \quad (2h)$$

$$n_y(t) = [ n_{y1}(t) \dots n_{ym}(t) ]^T \quad (2i)$$

여기서 위상지연 벡터  $\Phi$ 는 부어레이  $X$ 와  $Y$ 에 대한 관계를 나타내는 것으로 rotation operator이다. 한편 부어레이  $X$ 에 입사하는 신호에 대한 자기공분산행렬(auto-covariance matrix)  $R_{xx}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{xx} = E[ x(t)x(t)^H ] = ASA^H + \sigma^2 I \quad (3a)$$

여기서  $S = E[ s(t)s(t)^H ]$ 는 표적신호의 공분산행렬

이고,  $(\cdot)^H$ 는 허미시안(Hermitian) 연산을 의미한다. 같은 방법으로 부어레이  $X$ 와  $Y$ 사이의 교차공분산행렬(cross covariance matrix)  $R_{xy}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{xy} = E[x(t)y(t)^H] = AS\phi^H A^H + \sigma^2 I \quad (3b)$$

(3a)와 (3b)식에서 잡음을 제외한 신호의 공분산행렬을  $C_{xx}$ 와  $C_{xy}$ 라고 하면, 이들은 다음 식으로 전개할 수 있다.

$$C_{xx} = R_{xx} - \sigma^2 I = ASA^H \quad (4a)$$

$$C_{xy} = R_{xy} - \sigma^2 I = AS\phi^H A^H \quad (4b)$$

(4a)와 (4b)식으로부터 얻어진 행렬쌍  $\{C_{xx}, C_{xy}\}$ 의 일반화된 고유치와 고유벡터(generalized eigenvalue and eigenvector)는 아래식을 통하여 구하게 된다.

$$C_{xx} e = \lambda C_{xy} e \quad (5)$$

일반화된 고유치를 구하기 위해 (5)식을 (4a)식과 (4b)식을 이용하여 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{xx} - \lambda C_{xy} &= ASA^H - \lambda AS\phi^H A^H \\ &= AS(I - \lambda\phi^H)A^H \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $A$ 와  $S$ 는 zero 행렬이 아니므로 다음 식이 성립한다.

$$I - \lambda\phi^H = 0 \quad (7a)$$

$$\lambda = \phi_{ii} = e^{jw_0 d \sin \theta / c} \quad (7b)$$

여기서  $\phi_{ii}$ 는 회전행렬  $\phi$ 의  $i$ 번째 대각성분을 나타낸다<sup>4)</sup>. 또한  $\arg(\lambda)$ 를 일반화된 고유치  $\lambda$ 의 편각이라고 하면 (7c)식에 의해 도래각  $\theta_i$ 를 결정할 수 있다.

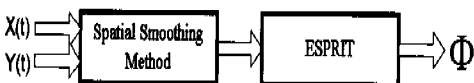


그림 2. 개선된 ESPRIT

$$\theta_i = \sin^{-1} \left( \frac{c \arg(\lambda)}{w_0 d} \right) \quad (7c)$$

## 2. 개선된 ESPRIT 알고리즘

### (Modified ESPRIT algorithm)

ESPRIT 알고리즘은 incoherent한 신호에 대해서는 매우 뛰어난 성능을 보여준다<sup>5)</sup>. 그러나 coherent한 정도가 증가할수록 그 분해능은 급격히 떨어지며, coherent한 신호일 경우 분해가 불가능하게 되어 신호의 도래각을 추정할 수 없다. 이는 표적신호가 coherent한 경우 표적신호의 공분산 행렬  $S$ 가 특이성(singularity)을 갖기 때문이다<sup>19)10)</sup>.

본 논문에서는 이러한 공분산행렬  $S$ 의 특이성을 없애 주기 위해 개선된 ESPRIT(Modified ESPRIT) 알고리즘을 제안한다. 이는 ESPRIT 알고리즘은 그림 2에서 보는 바와 같이 spatial smoothing 방법을 ESPRIT알고리즘의 전단에 먼저 적용함으로써 가능하게 된다<sup>11)12)</sup>.

### 1) Spatial smoothing 방법

Spatial smoothing 방법은 기존의 수신기에 몇 개의 수신기를 더 배치한 다음 수신기 군(group)으로 묶어 공간 공분산 행렬을 구하여 그것을 평균하는 방법이다. 이 방법을 쓸 경우 수신기에 입사되는 신호는 더 이상 상관화가 되지 않고, 이로 인해 coherent한 신호에 대한평균공분산 행렬의 특이성도 없어진다.

예를 들어 그림 3과 같이 수신기를 구성했다고 하면, spatial smoothing 방법은 3개의 수신기를 한 그룹으로 묶어 공간 공분산 행렬  $R_1, R_2$ 를 구한 후, 두 개의 공간 공분산 행렬을 평균하여 최종 공간 공분산 행렬  $\bar{R}$ 을 구하게 된다.

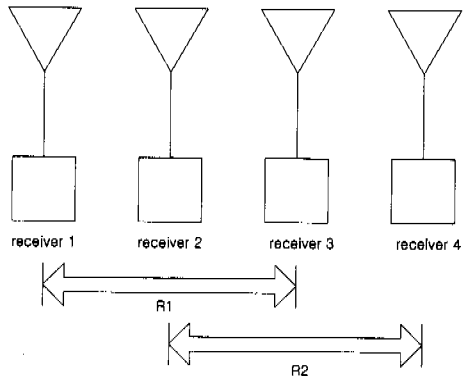


그림 3. Spatial smoothing 방법

이를 일반화하기 위하여,  $j$ 번째 수신기그룹에 입사하는 신호의 모델을 다음과 같이 표시하도록 하자.

$$x(t) = AD^{(j-1)}s(t) + n(t) \quad (8)$$

여기서  $D = \text{diag}[e^{-j\omega_0\tau_1} \dots e^{-j\omega_0\tau_d}]$ 는 각 수신기 간의 시간지연을 표시하는 대각행렬이다.  $\omega_0$ 는 표적신호의 중심주파수,  $\tau_i (i=1, \dots, d)$ 는 각 수신기 사이의 지연시간을 의미한다. 따라서  $j$ 번째 수신기 그룹의 공간 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$R_j = AD^{(j-1)}SD^{H(j-1)}A^H + \sigma^2 I \quad (9)$$

공간 공분산 행렬들의 평균  $\bar{R}$ 을 구하면,

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J R_j \\ &= A \left( \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J D^{(j-1)}SD^{H(j-1)} \right) A^H + \sigma^2 I \end{aligned} \quad (10)$$

이다. 여기서  $J$ 는 수신기 그룹의 개수이다.

이를 행렬식으로 표현하면 다음의 (11)식과 같다.

$$\bar{R} = A\bar{S}A^H + \sigma^2 I \quad (11)$$

이때 행렬  $\bar{S}$ 는 비특이성을 가진다.  $\bar{S}$ 가 비특이성을 가지는 이유는 대각행렬  $D$ 가  $S$ 를 분해하여 비특이성을 가지는 vandermonde 행렬을 형성하기 때문이다<sup>[9]</sup>.

### 2) 개선된 ESPRIT(Modified ESPRIT)

그림 1의 환경에 대하여 각 부어레이에 입사하는 신호에 대한 자기 공분산 행렬과 교차 공분산 행렬을 식(8)의 신호모델을 적용하여 구하면 다음과 같다.

$$R_{xx} = AD^{(j-1)}SD^{H(j-1)}A^H + \sigma^2 I \quad (12a)$$

$$R_{xy} = AD^{(j-1)}S\phi^H D^{H(j-1)}A^H + \sigma^2 I \quad (12b)$$

수신기 그룹에 대한 공간 공분산 행렬  $\bar{R}_{xx}$ 와  $\bar{R}_{xy}$ 은 spatial smoothing 방법에 의하여 아래의 (13a)와 (13b)식과 같이 된다.

$$\bar{R}_{xx} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J R_{xx} \quad (13a)$$

$$\bar{R}_{xy} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J R_{xy} \quad (13b)$$

(13a)와 (13b)식으로부터 수신기 그룹의 평균 공분산 행렬  $\bar{C}_{xx}$ 와  $\bar{C}_{xy}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{C}_{xx} = \bar{R}_{xx} - \sigma^2 I \quad (14a)$$

$$\bar{C}_{xy} = \bar{R}_{xy} - \sigma^2 I \quad (14b)$$

여기에, 일반화된 고유치  $\lambda$ 는 아래 식에 의해 결정되어진다.

$$\bar{C}_{xx} \hat{e} = \lambda \bar{C}_{xy} \hat{e} \quad (15)$$

이렇게 얻어진 일반화된 고유치  $\lambda$ 를 이용하여 표적신호성분의 도래각을 구하는 식은 (7c)식에 의해 아래와 같다.

$$\theta_i = \sin^{-1} \left( \frac{c \arg(\lambda)}{\omega_0 \delta} \right) \quad (16)$$

여기서  $\arg(\lambda)$ 는 일반화된 고유치  $\lambda$ 의 편각이다.

## III. 실험 및 고찰

개선된 ESPRIT 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 Matlab을 사용하여 도래각에 대한 Monte - Carlo simulation을 수행함으로써 임의의 데이터로부터 도래각의 추정값에 대한 평균지승근오차를 구하였다.

### 1. 실험 환경

그림 3과 같이 4개의 수신기를 가지는 어레이를 신호모델로 사용하였다. 표적신호는 중심주파수가 5 GHz인 초고주파를 사용하였다.

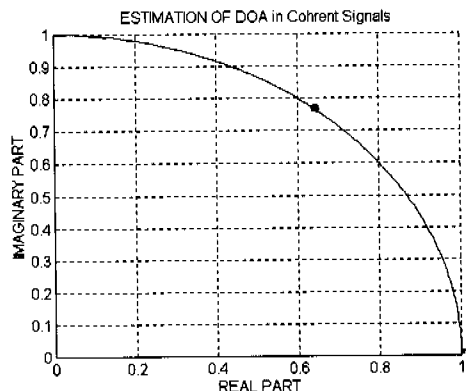


그림 4. Coherent한 신호에 대한 ESPRIT 스펙트럼

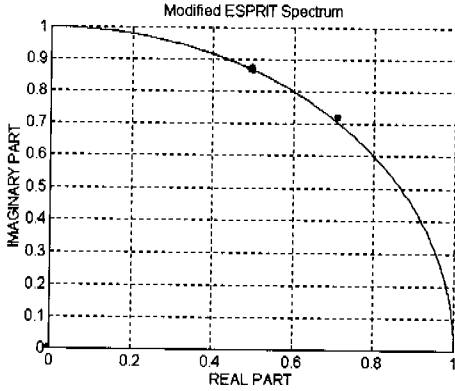


그림 5. Coherent한 신호에 대한 개선된 ESPRIT 스펙트럼

이 모델로부터 두 개의 수신기 그룹을 형성하였고 각 수신기 그룹의 공간 공분산 행렬을 평균하여 최종 공간 공분산 행렬을 구한 후 일반화된 고유치 값을 구하였다. 잡음은 첨가 백색 가우시안 잡음 (additive white gaussian noise)을 사용하였고 표적 신호가 45° 60° 의 방향을 갖는 신호를 실험대상으로 하여 그 성능을 분석하였다.

### 2. 개선된 ESPRIT 스펙트럼

그림 4와 그림 5는 coherent 한 신호에 대하여 기존의 ESPRIT 알고리즘과 개선된 ESPRIT 알고리즘을 각각 적용하여 구한 도래각의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 결과는 극좌표계의 형태로 나타내었으며 반시계방향으로 각도가 회전하도록 되어 있다. 그리고 표적신호는 수신기에 45° 와 60° 의 방향으로 입사하고 있다. 기존의 ESPRIT 알고리즘으로는 그림 4에서 보는 바와 같이 분해가 불가능하다. 하지만 개선된 ESPRIT 알고리즘을 사용할 경우 그림 5에서 보는 바와 같이 45° 와 60° 의 도래각을 정확하게 분해할 수 있다. 보다 더 정확한 분석을 위해 추정된 파라미터  $\theta$ 의 오차에 대한 RMSE(root meansquared error:평균 자승근 오차)를 다양한 경

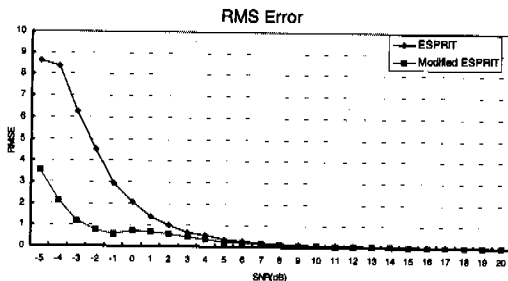


그림 6. Incoherent한 신호환경하에서의 RMS 에러

우에 대하여 살펴보았다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_i - \theta_0)^2} \quad (17)$$

여기서  $N$ 은 반복횟수를 나타내고,  $\hat{\theta}_i$ 는  $i$ 번째 추정되는 도래각을 나타내고,  $\theta_0$ 는 신호의 입사 각도를 나타낸다.

### 3. Incoherent한 신호에 대한 성능분석

그림 6은  $N$ 값을 250으로 두고 모의실험하여 RMSE를 구하여 나타낸 결과이다. SNR이 0dB 이상인 경우에는 큰 차이가 나지 않지만, SNR이 -5dB가 되면 개선된 ESPRIT의 RMSE값은 기존의 ESPRIT 알고리즘에 비해 약 5° 정도 더 좋은 추정 성능을 나타내고 있다.

### 4. 주파수가 거의 동일한 신호에 대한 성능분석

그림 7은 주파수가 거의 동일한 신호에 대한 RMSE를 SNR에 대하여 나타낸 그림이다. SNR이 0dB이상인 경우에는 개선된 ESPRIT 알고리즘은 기존의 ESPRIT 알고리즘에 비해 분해능면에서 큰 차이가 없다. 하지만 SNR이 0dB이하가 되면 기존의 ESPRIT 알고리즘은 급격히 그 분해능이 떨어지게 되어, SNR이 -5dB이 되면 14° 정도의 큰 추정 오차가 생기게 된다. 이와 같이 주파수가 비슷한 신호에서 그 분해능이 떨어지는 이유는 ESPRIT 알고리즘 상에서 발생하게 되는 공간 공분산 행렬의 특이성(singularity)에서 기인한다.

### 5. Coherent한 신호에 대한 성능분석

그림 8은 coherent 한 신호환경에서 개선된 ESPRIT 알고리즘으로 추정된 결과를 분석한 것이다. 기존의 ESPRIT 알고리즘에서는 coherent 한 표적신호에 대하여 도래각을 분해할 수 없다. 이는 공분산행렬  $S$ 가 특이성을 가지기 때문이다.

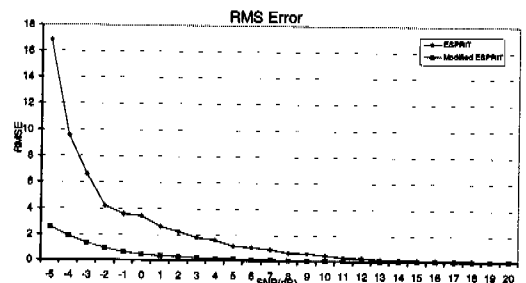


그림 7. 주파수가 거의 비슷한 신호환경하에서의 RMS 에러

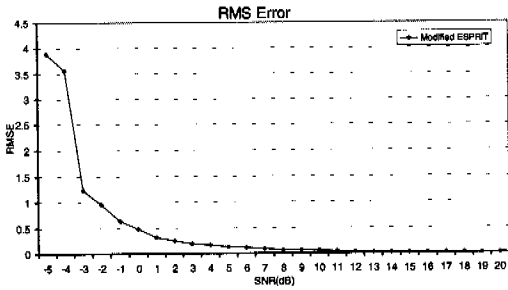


그림 8. Coherent한 신호 환경에서의 개선된 ESPRIT의 RMS 에러

따라서 기존의 ESPRIT에 따른 추정 결과는 그림에서 나타내지 않았다. 그림 7에서 보면 SNR이 -5dB인 경우에 원래 표적신호의 각도에 비해 약 4° 정도의 오차를 나타내고 있다.

#### 6. Incoherent한 경우와 coherent한 경우에 대한 성능분석

그림 9는 개선된 ESPRIT 알고리즘을 incoherent한 경우와 coherent한 경우에 대하여 실험하여 성능을 분석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 개선된 ESPRIT 알고리즘은 coherent한 신호와 incoherent한 신호에 대하여 SNR이 같을 경우 RMSE 값이 거의 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 이는 개선된 ESPRIT 알고리즘이 다양한 환경 변화에 대하여 robust한 성능을 보유하고 있음을 의미한다 하겠다.

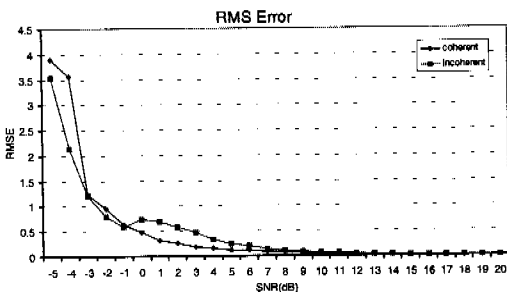


그림 9. Coherent한 신호와 incoherent한 신호에 대한 개선된 ESPRIT의 RMS 에러

### IV. 결론

본 논문에서는 도래각 추정 알고리즘인 ESPRIT 알고리즘의 최대 단점인 coherent한 신호에 대한 분해능을 개선하는 방법을 제안하였다. Spatial smoothing 방법을 기존의 ESPRIT 알고리즘 전단에 적용하여 추정성능을 개선하였다. 개선된 ESPRIT

알고리즘은 그 성능면에서 coherent한 신호에 대하여 기존의 ESPRIT 알고리즘보다 월등히 뛰어난 실적을 통해 입증할 수 있었으며, 이러한 개선된 ESPRIT 알고리즘은 레이더 신호처리에서 도래각 추정성능의 개선 등 광범위한 분야에서 널리 활용될 수 있다.

향후 연구방향으로는 개선된 ESPRIT 알고리즘을 이동하는 목표물에 대한 도래각분해 알고리즘에 적용함으로써 움직이는 목표물의 추적에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고 문헌

- [1] J. Capon, "High-resolution frequency wavenumber spectrum analysis", *Proc. of IEEE*, vol.57, No.8, pp. 1408-1418, Aug. 1969.
- [2] J. P. Burg, *Maximum entropy spectral analysis*, Ph.D. dissertation, stanford University, 1975.
- [3] R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. AP-34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [4] A. Paulraj, R. Roy and T. Kailath, "A Subspace Rotation Approach to Signal Parameter Estimation", *Proc. IEEE*, vol. 74, no. 7, pp. 1044-1045, July 1986.
- [5] R. Roy, A. Paulraj and T. Kailath, "Comparative Performance of ESPRIT and MUSIC for Direction-of-Arrival Estimation", *PROC. IEEE ICASSP*, pp. 2344-2347, 1987.
- [6] I.I.Kim, S.H.Lee, S.B.Park and K.K.Lee, "Efficient MUSIC Alogorithm with Target Number Detection Criterion", *대한전자공학회지*, vol. 32, B4, Apr. 1995.
- [7] R. Roy, A. Paulraj and T. Kailath, "ESPRIT-A Subspace Rotation Approach to Estimation of Parameter Estimation", *IEEE Trans. Acoustics Speech Signal Processing*, vol. ASSP-34, pp. 1340-1342, Oct. 1986.
- [8] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT-Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques", *IEEE Trans. Acoustics Speech Signal Processing*, vol. 37, no. 7, pp. 984-995, July 1989.
- [9] T.J. Shan, M. Wax and T. Kailath, "On Spatial

Smoothing for Direction of Arrival Estimation of Coherent Signals”, *IEEE Trans. Acoustics Speech Signal Processing*, vol. ASSP-33, no. 4, pp.806-811, Aug. 1985.

- [10] H. Wang and M. Kaveh, “Coherent Signal-Subspace Processing for the Detection and Estimation of Angle of Arrival of Multiple Wide-Band Sources”, *IEEE Trans. Acoustics Speech Signal Processing*, vol. ASSP-34, no. 4, pp. 823-831, Aug. 1985.
- [11] 정철곤, 김중규, “Coherent 信號의 到來角 推定에 關한 研究”, *추계마이크로파 및 전파기술대회*, pp. 203-206, 1997.
- [12] 정철곤, *固有值 分解 方式을 이용한 廣大域 信號의 到角 推定에 關한 研究*, 碩士學位論文, 成均館大學校, 1996.

정 철 곤(Cheol-kon Jung)

정희원



1995년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 학사  
 1997년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 석사  
 1997년~현재 : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 박사과정

<주관심 분야> 레이더신호처리, 영상처리, 컴퓨터비전, 컴퓨터그래픽스, 디지털비디오처리

김 중 규(Joong-kyu Kim)

정희원



1980년 : 서울대학교 전자공학과 졸업  
 1982년 : 서울대학교 전자공학과 석사  
 1989년 : The University of Michigan, Ann Arbor, Department of Electrical and Computer Engineering Ph.D.

1980년~1981년 : 한국전자통신연구소 위촉연구원  
 1989년~1990년 : University of Michigan, Post Doctoral

1990년~1991년 : 삼성전자 선임연구원

1992년~현재 : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 부교수

<주관심 분야> 적응신호처리, 레이더신호처리, 의학 영상신호처리, 음향신호처리, 디지털비디오처리