

논문 2012-49SP-4-13

## 개선된 정준상관분석을 이용한 신호 분리 알고리즘

### (Improved Blind Signal Separation Based on Canonical Correlation Analysis)

강 동 훈\*, 이 용 욱\*, 오 왕 록\*\*

(Donghoon Kang, Yongwook Lee, and Wangrok Oh)

#### 요 약

정준상관분석 (canonical correlation analysis, CCA)은 두 변수집단 사이의 선형 관계를 측정하는 확률적 분석 기법으로 이를 이용하여 다수의 신호가 혼재되어 수신된 신호로부터 각각의 신호원을 분리하는 것이 가능하다. 기존에 CCA와 자기회귀 (auto regressive) 기법을 이용하여 혼재된 신호를 분리하는 기법이 제안되었으나 신호원 분리를 효과적으로 수행하기 위해서는 높은 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio)가 요구되는 문제가 있다. 본 논문에서는 자기회귀 기법의 파라미터 계산시 잡음성분이 포함되어있는 자기공분산 행렬의 주대각 원소를 제거하여 잡음의 영향을 최소화하고 이를 통하여 신호원 분리 성능을 개선하는 방안을 제안한다. 제안하는 기법은 기존에 제안된 CCA와 자기회귀를 이용한 신호 분리 기법에 비하여 더 우수한 신호 분리 성능을 보일 뿐 만 아니라 신호원 분리 과정에서 요구되는 계산량을 줄일 수 있다.

#### Abstract

The CCA (canonical correlation analysis) is a well known analysis tool that measures the linear relationship between two variable sets and it can be used for blind source separation (BSS). In previous works, a blind source separation scheme based on the CCA and auto regression was proposed. Unfortunately, the proposed scheme requires high signal-to-noise ratio for successful source separation. In this paper, we propose an improved BSS scheme based on the CCA and auto regression by eliminating the main diagonal elements of auto covariance matrix. Compared to the previously proposed BSS scheme, the proposed BSS scheme not only offers better source separation performance but also requires low computational complexity.

**Keywords :** CCA, Auto-Regressive, Blind Source Separation

#### I. 서 론

독립적인 다수의 신호원이 동시에 수신되는 경우 참조 신호 또는 원 신호에 대한 사전 정보 없이 원하는 신호원을 분리해낼 수 있는 블라인드 신호 분리 (blind source separation) 기법들에 대한 많은 연구가 진행되었다. 블라인드 신호 분리 기법은 크게 신호원의 통계

적 특성을 이용하여 신호원을 분리하는 정준상관분석 (canonical correlation analysis, CCA) 및 독립요소분석 (independent component analysis, ICA)과 배열 안테나 (antenna array)를 이용하여 신호원의 입사각 (direction of arrival, DoA)을 추정하고 이를 기반으로 신호원을 분리하는 기법으로 나눌 수 있다<sup>[1~4]</sup>.

정준상관분석은 두 변수집단 사이의 선형 관계를 측정하는 확률적 분석 기법으로 이를 이용하여 다수의 신호가 혼재되어 수신된 신호로부터 각각의 신호원을 분리하는 것이 가능하다. 기존에 정준상관분석 기법과 자기회귀 (auto regression) 기법을 이용한 블라인드 신호

\* 학생회원, \*\* 정회원-교신저자, 충남대학교 정보통신공학과

(Department of Information Communications Engineering, Chungnam National University)

접수일자: 2011년12월13일, 수정완료일: 2012년4월13일

원 분리 기법이 제안되었다<sup>[5]</sup>. 기존에 제안된 기법의 경우 신호원 분리 성능이 잡음의 영향에 민감하여 효율적으로 신호원을 분리하기 위해서는 높은 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)가 확보되어야하는 문제가 있다.

본 논문에서는 정준상관분석과 자기회귀 기법을 이용한 블라인드 신호원 분리 기법의 문제점 중 하나인 잡음의 영향을 줄이기 위하여 자기회귀 기법 적용 과정에서 사용되는 자기공분산 행렬의 주대각 원소들을 제거하여 블라인드 신호원 분리 기법의 성능을 개선할 수 있는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 기존에 제안된 기법에 비하여 우수한 신호원 분리 성능을 보일 뿐만 아니라 자기공분산 행렬의 주대각 원소들을 제거함으로써 신호원 분리 과정에서 요구되는 계산량을 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 정준상관분석과 자기회귀 기법을 이용한 블라인드 신호원 기법에 대하여 살펴보고 III장에서 블라인드 신호 분리 성능을 개선할 수 있는 기법을 제안한다. IV장에서는 제안하는 기법의 신호원 분리 성능을 제시하고 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 정준상관분석을 이용한 블라인드 신호원 분리

1936년 H. Hotelling에 의하여 제안된 정준상관분석은 두 변수집단 사이의 선형 관계를 측정하는 확률적 분석 기법으로 정준상관분석 및 자기회귀 기법을 이용하여 다수의 신호가 혼재되어 수신된 신호로부터 각각

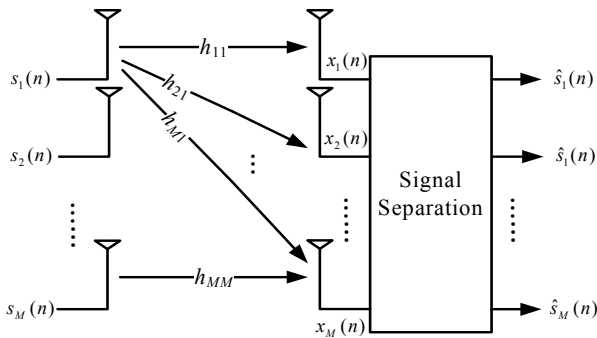


그림 1.  $M \times M$  MIMO 시스템을 고려한 신호원 분리 기법의 블록다이어그램

Fig. 1. The block diagram of signal separation considering  $M \times M$  MIMO system.

의 신호원을 분리하는 것이 가능하다<sup>[5]</sup>.

그림 1과 같은  $M \times M$  MIMO (multiple input multiple output) 시스템에서 독립적인 송신신호  $s_m(n)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ 과 각각의 안테나로 수신된 신호  $x_m(n)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}(n) = \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ \vdots \\ x_M(n) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \cdots & h_{MM} \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}} \underbrace{\begin{bmatrix} s_1(n) \\ s_2(n) \\ \vdots \\ s_M(n) \end{bmatrix}}_{\mathbf{s}(n)} + \underbrace{\begin{bmatrix} n_1(n) \\ n_2(n) \\ \vdots \\ n_M(n) \end{bmatrix}}_{\mathbf{n}(n)} \quad (1)$$

$\mathbf{H}$ 는 채널 행렬 (channel matrix)을 나타내며 채널은  $N$ 개의 샘플구간동안 변하지 않는다고 가정한다.  $\mathbf{n}(n)$ 은 평균이 0이고 차원 당 분산이  $N_0/2$ 인 가산성 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise)이다.

혼합된 신호들의 집합으로 구성된  $\mathbf{x}(n)$ 에서 송신신호를 분리하기 위해서는 채널 행렬  $\mathbf{H}$ 의 역행렬을 구함으로써 분리가 가능하며 이는 정준상관분석과 자기회귀 기법을 이용하여 구할 수 있다<sup>[5]</sup>.

정준상관분석과 자기회귀 기법을 이용한 블라인드 신호원 분리 알고리즘을 도식화하면 그림 2와 같다. 수신 신호  $\mathbf{x}(n)$ 으로부터 신호원들을 분리하기 위한 전처리과정으로 자기회귀 기법을 사용하며 이는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x'_m(n) = \sum_{i=1}^d z_{i,m} x_m(n+i), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

식 (2)에서 볼 수 있는 바와 같이  $m$ 번째 안테나로 수신된 신호  $x_m(n)$ 에 대응되는  $x'_m(n)$ 은  $x_m(n)$ 에 인접한 신호 샘플들의 선형 조합 (linear combination)으로 생성된다. 식 (2)에서  $d$ 는 선형 조합에 사용되는 인접 샘플의 개수를 나타내며  $z_{i,m}$ ,  $i = 1, 2, \dots, d$ 은 선형 조합에 사용되는 인접 샘플 값들에 대한 가중치 계

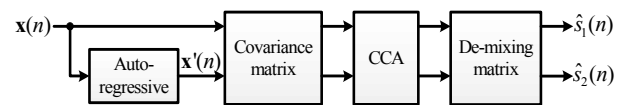


그림 2. 블라인드 신호원 분리 알고리즘의 블록다이어그램

Fig. 2. Block-diagram for signal separation.

수 (weighting coefficient)이다.

자기회귀 기법에서 사용되는 가중치 계수  $z_{i,m}$ ,  $i = 1, 2, \dots, d$ 은 Yule-Walker 방정식을 이용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 & c_1 & \cdots & c_{d-1} \\ c_1 & c_0 & \cdots & c_{d-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{d-1} & c_{d-2} & \cdots & c_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{1,m} \\ z_{2,m} \\ \vdots \\ z_{d,m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기에서  $c_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, d$ 는  $x_m(n)$  신호의 자기공분산 (auto-covariance)으로 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며

$$c_i = E[x_m(n)x_m(n-i)] \quad (4)$$

식 (3)으로부터 자기회귀 기법에 사용되는 가중치 계수 벡터 (vector)  $\mathbf{z}_m$ 은 식 (5)를 통하여 구할 수 있다.

$$\mathbf{z}_m = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{c} \quad (5)$$

식 (5)에서 구한 가중치 계수 벡터를 이용하여  $x_m(n)$ 으로부터  $x'_m(n)$ 을 생성하고 이를 기반으로 정준상관분석을 수행한다.

정준상관분석은 혼합된 신호원의 자기상관 특성을 이용하여 신호를 분리한다. 각각의 신호원들 간에 상관관계가 없고 서로 다른 자기상관 값을 갖는 경우 신호원들의 선형조합으로 생성된 신호의 자기상관 값은 항상 각각의 신호원들의 가장 큰 자기상관 값 보다 작거나 같다<sup>[5]</sup>. 따라서 정준상관분석을 이용하여 혼합된 신호의 자기상관이 최대가 되는 선형조합을 찾고 이를 이용하여 신호를 분리하는 것이 가능하다.

혼합된 신호  $\mathbf{x}(n)$ 의 선형 조합  $a(n)$ 과  $\mathbf{x}(n)$ 의 지연된 신호로 구성된  $\mathbf{x}'(n)$ 의 선형 조합  $a'(n)$ 은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} a(n) &= \mathbf{w}_a^T \mathbf{x}(n) \\ a'(n) &= \mathbf{w}_a^T \mathbf{x}'(n) \end{aligned} \quad (6)$$

$\mathbf{w}_a^T$ 는  $\mathbf{w}_a$ 의 전치행렬 (transpose matrix)을 나타내며 정준상관분석을 이용하여  $a(n)$ 과  $a'(n)$ 의 상관 계수가 최대가 되는 가중치 벡터  $\mathbf{w}_a$ 를 구함으로써 혼합된 신호를 분리할 수 있다. 선형 조합으로 표현된  $a(n)$ 과  $a'(n)$ 의 상관계수는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \rho(a, a') &= \frac{E[a(n)a'(n)]}{\sqrt{E[a(n)^2]E[a'(n)^2]}} \\ &= \frac{E[\mathbf{w}_a^T \mathbf{x}(n) \mathbf{x}'(n)^T \mathbf{w}_a]}{\sqrt{E[\mathbf{w}_a^T \mathbf{x}(n) \mathbf{x}(n)^T \mathbf{w}_a]E[\mathbf{w}_a^T \mathbf{x}'(n) \mathbf{x}'(n)^T \mathbf{w}_a]}} \\ &= \frac{\mathbf{w}_a^T E[\mathbf{x}(n) \mathbf{x}'(n)^T] \mathbf{w}_a}{\sqrt{(\mathbf{w}_a^T E[\mathbf{x}(n) \mathbf{x}(n)^T] \mathbf{w}_a)(\mathbf{w}_a^T E[\mathbf{x}'(n) \mathbf{x}'(n)^T] \mathbf{w}_a)}} \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서  $E[\mathbf{x}(n) \mathbf{x}(n)^T]$ 와  $E[\mathbf{x}'(n) \mathbf{x}'(n)^T]$ 는 자기공분산 행렬 (auto-covariance matrix)로 각각  $\mathbf{C}_{xx}$ 와  $\mathbf{C}_{x'x'}$ 로 표현하고  $E[\mathbf{x}(n) \mathbf{x}'(n)^T]$ 는 상호 공분산행렬 (cross-covariance matrix)로  $\mathbf{C}_{xx'}$ 으로 표현하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho(a, a') = \frac{\mathbf{w}_a^T \mathbf{C}_{xx'} \mathbf{w}_a}{\sqrt{\mathbf{w}_a^T \mathbf{C}_{xx} \mathbf{w}_a \mathbf{w}_a^T \mathbf{C}_{x'x'} \mathbf{w}_a}} \quad (8)$$

식 (8)에서 Cauchy-Schwarz inequality에 의하여 상관계수  $\rho$ 가 최대가 될 때 해를 구하면 식 (9)와 같이 나타나며<sup>[6]</sup>

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{xx}^{-1} \mathbf{C}_{xx'} \mathbf{C}_{x'x'}^{-1} \mathbf{C}_{x'x'} \mathbf{w}_a &= \rho^2 \mathbf{w}_a \\ \mathbf{C}_{x'x'}^{-1} \mathbf{C}_{x'x} \mathbf{C}_{xx}^{-1} \mathbf{C}_{xx'} \mathbf{w}_a &= \rho^2 \mathbf{w}_a \end{aligned} \quad (9)$$

행렬  $\mathbf{C}_{xx}^{-1} \mathbf{C}_{xx'} \mathbf{C}_{x'x'}^{-1} \mathbf{C}_{x'x'}$ 와  $\mathbf{C}_{x'x'}^{-1} \mathbf{C}_{x'x} \mathbf{C}_{xx}^{-1} \mathbf{C}_{xx'}$ 의 고유값 (eigenvalue)과 고유벡터 (eigenvector)가 각각  $\rho^2$ 과  $\mathbf{w}_a$ 인 것을 확인할 수 있다. 또한 무게 벡터  $\mathbf{w}_a$ 를 이용하여 역혼합 행렬 (demixing matrix)을 구성할 수 있으며, 역혼합 행렬을 이용하여 신호원을 분리할 수 있다.

### III. 주대각 원소 제거 기법

정준상관분석과 자기회귀 기법을 이용한 블라인드 신호원 분리 기법의 신호원 분리 성능은 잡음에 의한 영향을 크게 받는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 기존에 제안된 블라인드 신호원 분리 기법의 잡음에 대한 신호원 분리 성능을 개선할 수 있는 기법을 제안한다.

$m$ 번째 안테나로 수신된 신호는 식 (10)과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$x_m(n) = [h_{m1} \ h_{m2} \ \cdots \ h_{mM}] \begin{bmatrix} s_1(n) \\ s_2(n) \\ \vdots \\ s_M(n) \end{bmatrix} + n_m(n) \\ = \mathbf{h}_m \mathbf{s}(n) + n_m(n) \quad (10)$$

$n_m(n)$ 은 평균이 0이고 차원 당 분산이  $N_0/2$ 인 가산성 백색 가우시안 잡음이다. 식 (10)의  $m$ 번째 안테나로 수신된 신호와  $i$ 샘플만큼 지연된 신호와의 공분산을 구하면 식 (11)과 같다.

$$c_i = E[x_m(n)x_m(n-i)] \\ = E[\{\mathbf{h}_m \mathbf{s}(n) + n_m(n)\} \{\mathbf{h}_m \mathbf{s}(n-i) + n_m(n-i)\}] \\ = E[\mathbf{h}_m \mathbf{s}(n) \mathbf{h}_m \mathbf{s}(n-i)] + E[n_m(n)n_m(n-i)] \quad (11)$$

식 (11)에서  $E[n_m(n)n_m(n-i)]$ 는 잡음의 공분산을 나타내고  $i$ 가 0일 경우  $N_0/2$ 의 값을 갖으며  $i$ 가 0이 아닐 경우 잡음의 공분산은 0이 되는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (3)에서 수신신호의 자기공분산 행렬의 주대각 원소가 잡음에 대한 영향을 받는 것을 확인 할 수 있다. 잡음에 대한 영향을 고려하여 식 (3)을 다시 쓰면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_d \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}} = \underbrace{\begin{bmatrix} c_0 + c_{n_0} & c_1 & \cdots & c_{d-1} \\ c_1 & c_0 + c_{n_0} & \cdots & c_{d-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{d-1} & c_{d-2} & \cdots & c_0 + c_{n_0} \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} z_{1,m} \\ z_{2,m} \\ \vdots \\ z_{d,m} \end{bmatrix}}_{\mathbf{z}_m} \quad (12)$$

식 (12)에서  $c_{n_0}$ 는 잡음의 분산으로  $N_0/2$ 인 값을 갖는다. 식 (12)에서 자기공분산 행렬  $\mathbf{C}$ 의 주대각 원소에 항상 잡음에 의한 성분이 존재하며 이로 인하여 자기회귀 기법을 이용하여 가중치 계수 벡터,  $\mathbf{z}_m$ 을 추정할 경우 잡음에 의한 영향으로 정확한 값을 추정할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 잡음에 대한 블라인드 신호원 분리 기법의 성능을 개선하기 위하여 식 (13)과 같이 자기공분산 행렬  $\mathbf{C}$ 의 주대각 원소를 제거하는 기법을 제안한다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_d \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & c_1 & \cdots & c_{d-1} \\ c_1 & 0 & \cdots & c_{d-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{d-1} & c_{d-2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} z_{1,m} \\ z_{2,m} \\ \vdots \\ z_{d,m} \end{bmatrix}}_{\mathbf{z}_m} \quad (13)$$

자기공분산 행렬의 주대각 원소에는 송신신호와 잡음에 대한 정보가 포함되어 있다. 따라서 주대각 원소를 제거함으로써 송신신호에 대한 정보가 손실되지만 잡음의 영향을 줄여줌으로써 낮은 SNR 영역에서 더 우수한 신호원 분리 성능을 나타내는 것을 전산실험을 통하여 확인하였다.

#### IV. 전산실험 결과

전산실험 시  $2 \times 2$  MIMO와  $3 \times 3$  MIMO 시스템을 가정하였으며, 송신신호  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ ,  $s_3(t)$ 는 각각 독립적인 BFSK (binary frequency shift keying)신호를 가정하였다. 각 송신신호의 변수는 표 1과 같다.

자기회귀 기법의 파라미터  $d$ 는 2부터 4까지 변경해 가며 전산실험을 수행하였다.  $d$ 가 1인 경우 식 (14)의 자기공분산 행렬  $\mathbf{C}$ 가  $1 \times 1$  행렬이므로 제안하는 기법을 적용할 수 없고 논문 [5]에서 설명한 바와 같이 수

표 1. 전산실험 변수

Table 1. Simulation parameters.

	Source 1	Source 2	Source 3
Modulation	BFSK	BFSK	BFSK
Data bandwidth	1 MHz	1 MHz	1 MHz
Data rate	1 Mbps	0.67 Mbps	0.77 Mbps
Hopping bandwidth	2 MHz	2 MHz	2 MHz
# of the hopping slot	32	32	32
Sampling frequency	1 GHz	1 GHz	1 GHz
Channel	AWGN	AWGN	AWGN

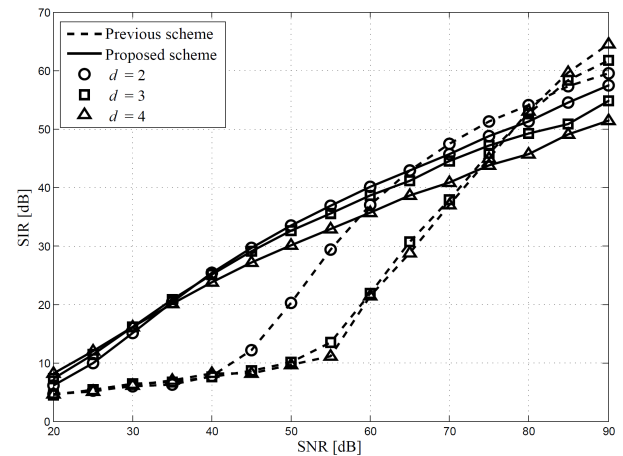


그림 3. SNR에 따른 블라인드 신호원 분리성능 ( $2 \times 2$  MIMO)

Fig. 3. Performance of the blind signal separation versus SNR ( $2 \times 2$  MIMO system).

신신호와 한 샘플 지연된 신호와의 상관관계가 작을 경우 정준상관기법이 잘 동작하지 않는다. 따라서 전산실험에서는  $d$ 가 2 이상인 경우를 고려하였다.

신호원 분리기법의 성능을 비교하기 위한 신호 대 간섭비 (signal-to-interference ratio, SIR)를 측정하였으며 SIR은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$SIR [dB] = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{E[s_m(t)^2]}{E[(s_m(t) - \hat{s}_m(t))^2]} \right\} \quad (14)$$

그림 3은 신호원이 2개인 경우 본 논문에서 제안하는 자기공분산 행렬  $\mathbf{C}$ 의 주대각 원소를 제거하는 기법과 기존에 제안된 정준상관분석과 자기회귀 기법을 이용한 신호원 분리 기법의 성능을 나타낸 것이다. 그림 3에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안하는 기법은 자기공분산 행렬의 주대각 원소를 제거함으로써 기존의 기법과 비교하였을 때 낮은 SNR 영역에서 더 우수한 신호분리 성능을 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 기법은 자기공분산 행렬의 주대각 원소를 제거함으로써 잡음에 의한 성능 열화를 낮추는 기법이라 할 수 있다. 그러나 자기공분산 행렬의 주대각 원소를 제거함으로써 송신 신호에 대한 정보도 같이 손실될 수 있으며 이로 인하여 높은 SNR 영역에서의 성능 열화를 예상할 수 있다. 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 SNR이 65 dB 이상일 경우 제안하는 기법에 비하여 기존 기법의 SIR이 더 높으나 기존 기법 대비 성능 열화 정도가 미미할 뿐만 아니라 일반적인 통신시스템의 동작 SNR 영역은 65 dB 보

다 낮은 영역이므로 거의 모든 동작 SNR 영역에서 제안하는 기법이 보다 나은 신호분리 성능을 보임을 확인할 수 있다.

그림 4는 신호원이 3개인 경우의 신호원 분리 성능을 나타낸 것이다. 신호원이 2개인 경우의 신호원 분리 성능과 마찬가지로 기존의 기법과 비교하였을 때 제안하는 기법이 낮은 SNR 영역에서 더 우수한 신호분리 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 정준상관분석과 자기회귀 기법을 이용한 블라인드 신호원 분리 기법의 잡음에 대한 신호원 분리 성능을 개선하기 위하여 자기회귀 기법 적용 과정에서 사용되는 자기공분산 행렬의 주대각 원소들을 제거하는 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 기존에 제안된 기법보다 더 우수한 신호원 분리 성능을 보일 뿐만 아니라 주대각 원소를 제거함으로써 신호원 분리 과정에서 요구되는 계산량을 줄일 수 있는 장점이 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. R. Kettenring, "Canonical Analysis of Several Sets of Variables," *Biometrika*, vol. 58, pp. 433-451, 1971.
- [2] A. Hyvarinen, and E. Oja, "Independent component analysis: Algorithms and applications," *Neural Networks*, vol. 13, no. 4, pp. 411-430, June 2000.
- [3] X. Liu, N. D. Sidiropoulos, and A. Swami, "Joint hop timing and DOA estimation for multiple noncoherent frequency hopped signals," in Proc. 2nd IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Proc. Workshop, Roseelyn, VA, Aug. 2002.
- [4] X. Liu, J. Li, and X. Ma, "An EM algorithm for blind hop timing estimation of multiple FH signals using an array system with bandwidth mismatch," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 56, pp. 2545-2554, Sept. 2007.
- [5] Magnus Borga and H. Knutsson, "A Canonical Correlation Approach to Blind Source Separation," *Linköping University, Sweden*, June, 2001.
- [6] W. D. Clercq, "Canonical Correlation Analysis Applied to Remove Muscle Artifacts from the

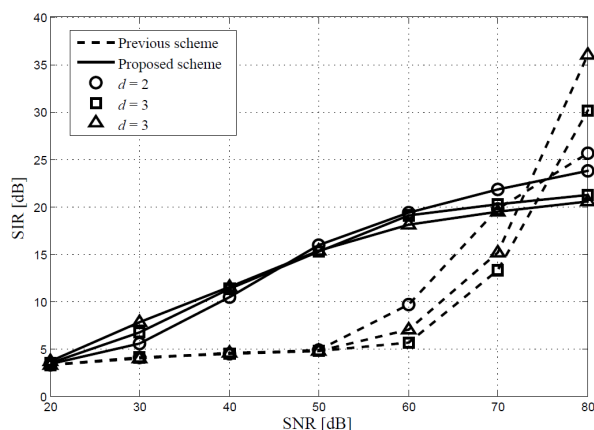


그림 4. SNR에 따른 블라인드 신호원 분리성능 (3×3 MIMO)

Fig. 4. Performance of the blind signal separation versus SNR (3×3 MIMO system).

Electroencephalogram," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 53, pp. 2583-2587, Nov. 2006.

---

— 저 자 소 개 —

---



강 동 훈(학생회원)  
2009년 충남대학교 전기정보통신  
공학부 학사  
2009년~현재 충남대학교 정보통  
신공학과 석박사통합과정  
<주관심분야 : 오류정정부호, 디  
지털 통신>



이 용 욱(학생회원)  
2008년 충남대학교 전기정보통신  
공학부 학사  
2010년 충남대학교 전자전파정보  
통신공학과 석사  
2010년~2011년 삼성전자 연구원  
2011년~현재 충남대학교 정보통  
신공학과 박사과정  
<주관심분야 : OFDM 시스템, 협력통신>



오 왕 록(정회원)-교신저자  
1994년 포항공과대학교  
전자전기공학과 학사  
1997년 포항공과대학교  
정보통신학과 석사  
2003년 포항공과대학교  
전기전자공학과 박사  
1994년~1995년 스탠더드텔레콤 연구원  
1997년~2000년 포항공과대학교 정보통신연구소  
전임연구원  
2003년~2006년 포항공과대학교 정보통신연구소  
전임연구원  
2006년~2010년 충남대학교 정보통신공학과  
조교수  
2010년~현재 충남대학교 정보통신공학과 부교수  
<주관심분야 : 통신시스템 설계 및 구현, 오류정  
정부호, MIMO 시스템>