

논문 2007-44SP-2-12

Unitary 변환을 이용한 Matrix Pencil 방법

(Matrix Pencil Method using Unitary Transform)

고진환*, 주위위**, 김태곤***

(Jinhwan Koh, Weiwei Zhou, and Taekon Kim)

요약

기존의 Matrix pencil 방식은 하나의 스냅샷으로 프로세싱 하기 때문에 신호의 다중경로가 존재하는 경우이거나 데이터 길이가 짧은 경우, 또는 환경이 nonstationary한 환경에서 DOA 추정에 적합한 방법이다. 그러나 array의 수가 많아지는 경우에는 복소수 계산으로 인하여 계산시간이 상당히 늘어나게 된다. 본 논문에서는 Matrix Pencil 방법의 계산량을 줄이기 위하여 unitary 변환을 이용한 Matrix Pencil 방법을 제안 하였다. Unitary 변환이 Matrix Pencil에 성공적으로 적용되었으며, 컴퓨터 실험결과는 SNR에 따른 error율이 일치함을 보여 준다.

Abstract

Since the Matrix Pencil (MP) method can be performed to estimate multiple DOAs by using only single snapshot, this method is suitable for short data length or when the environment is dynamic. As the number of array increases, the computational load increases due to complex number computation. This paper presents an approach based on a unitary matrix pencil (MP) algorithm to reduce the computational load. Unitary transformation for the MP method has been suggested and formulated successfully. The computer simulation shows that the error rate of proposed method agree with that of MP for different SNR values.

Keywords : DOA estimation, Matrix Pencil, Unitary transformation

I. 서론

이동통신 및 전자파 분야에서 필수적 기술이라 할 수 있는 것 중의 하나가 바로 지수함수(exponential)의 합으로 구성된 신호 속에서 지수부를 찾아내는 것이다. DOA(Degree of Arrival)추정이라고도 알려진 이러한 기술은 비단 이동통신, 전자파분야 뿐만 아니라 지진학(Seismography), 소나(Sonar), 레이더(Radar)등 전 학문 분야에서 공통적으로 다루는 중요한 문제이다.

많은 고분해능의 DOA 추정 알고리즘들이 분해능을

증가시키고 Rayleigh의 한계를 극복하고자 제안되었다. DOA 추정의 가장기본적인 방법이라고 할 수 있는것은 푸리에 해석에 기초를 둔 지연-합 법(Delay-and-Sum Method)과 최소분산법(minimum variance method)^[1~2]이 있다. 더욱 진보된 방법은 소위 superresolution 방법이라는 것으로 고유분해(Eigen-decomposition)를 이용한 Eigen-structure 알고리즘이 가장 우수한 것으로 알려져 있으며 여기에는 MUSIC (Multiple Signal Classification)^[3], Root-MUSIC^[4], ESPRIT(The Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)^[5] 등이 있다. 비교적 최근의 방법으로, Sarkar^[6]등에 의해 개발된 Matrix Pencil 방법은 신호의 eigenvalue를 이용하여 delay를 구해내는 것으로서 noise 성분을 Null space로 매핑하는 방식이다.

기본적으로 MUSIC 및 ESPRIT는 신호의 covariance

* 정회원, ** 학생회원 경상대학교 전기전자공학부 (School of Electrical and Electronic Engineering, ERI, GyeongSang National University)

*** 정회원, 고려대학교 전자 및 정보공학부 (Department of Electronics and Information Engineering, Korea University)

접수일자: 2006년4월3일, 수정완료일: 2007년2월12일

matrix를 사용하는 방식으로써 coherent 신호가 존재하는 경우 혹은 다중경로신호가 있는 경우에는 원래의 신호를 적절하게 추정할 수 없게 된다. Matrix Pencil 방식은 다중경로, coherent 신호가 있는 환경에서도 이론적으로 신호를 찾아낼 수 있으며 기본적으로 2차 통계 기법을 사용하지 않고 1차의 통계기법을 사용하므로 CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)가 낮다는 장점이 있다. 또한 Covariance matrix의 가정인 WSS(Wide Sense Stationary)가 필요하지 않으므로 시간에 따른 노이즈의 확률 분포의 변화가 심한 지역에서 이론적으로 보다 우수한 방식이라고 할 수 있다.

이러한 eigen-structure를 이용하는 알고리즘은 복소수 연산을 행하게 되므로 어레이의 개수나 snapshot의 개수가 많은 경우에는 상당한 연산량을 필요로 하게 된다. Huang 과 Yeh^[8]은 복소행렬을 고유치와 함께 실행렬로 변환할 수 있는 unitary transform을 제안하였으며, 실행렬만으로 행렬연산을 하게 되면 최대 4배의 계산량을 감소시킬 수 있다는 것을 보여주었다. Haardt 와 Nossek^[9]는 이 방법을 ESPRIT에 적용하여 계산량이 감소됨을 증명하였다.

본 연구에서는 root-MUSIC 등에 비하여 우수함이 입증된 Matrix Pencil 방식을 이용하여 실행렬만으로 연산이 되는 알고리즘을 개발하였다. II절에 실행렬로 변환할 수 있는 unitary 변환이 소개되었고 III절에서 Matrix Pencil 방식에 적용이 되었다. V절에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 계산량이 감소됨을 보여 주었다.

II. Unitary 변환

행렬 $A \in C^{P \times Q}$ 가 다음의 관계식을 만족하면 centro-Hermitian 행렬이라고 부른다^[9~10].

$$\Pi_P A^* \Pi_Q = A \tag{1}$$

$$\Pi_P = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & 1 & & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{P \times P}$$

여기서

A^* 는 행렬 A의 공액복소전치행렬이다.

이론1. 만일 벡터 $X = [x(0) \ x(1) \ x(2) \ \dots \ x(N-1)]^T$;

N은 홀수, 가 $\Pi_N X^* = X$ 을 만족하는 centro-Hermitian 행렬 이라면 행렬 Y는

$$Y = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(L) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-L-1) & x(N-L) & \dots & x(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times (L+1)} \tag{2}$$

centro-Hermitian 행렬이다.

증명 : $\Pi_N X^* = X$ 가 성립하므로

$$x^*(i) = x(N-i); \quad i=1,2,\dots,N \text{ 이고}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{N-L} Y^* \Pi_{L+1} &= \begin{bmatrix} x^*(N-1) & x^*(N-2) & \dots & x^*(N-L-1) \\ x^*(N-2) & x^*(N-3) & \dots & x^*(N-L-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x^*(L) & x^*(L-1) & \dots & x^*(0) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(L) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-L-1) & x(N-L) & \dots & x(N-1) \end{bmatrix} = Y \end{aligned}$$

이다. 그러므로 $Y \in C^{(N-L) \times (L+1)}$ 는 centro-Hermitian 행렬이다.

이론2^[9] : 임의의 행렬 Y 에 대해서

$$\left[Y : \Pi_{(N-L)} Y^* \Pi_{(L+1)} \right]$$

은 centro-Hermitian 행렬이다.

증명 : $A [B : C] = [A B : A C]$ 이 성립하고

$$[A : B] \Pi_{2N} = [B \Pi_N : A \Pi_N]$$

이므로,

$$\begin{aligned} &\Pi_{(N-L)} \left[Y : \Pi_{(N-L)} Y^* \Pi_{(L+1)} \right]^* \Pi_{(2L+2)} \\ &= \left[\Pi_{(N-L)} Y^* : \Pi_{(N-L)} \Pi_{(N-L)} Y \Pi_{(L+1)} \right] \Pi_{(2L+2)} \\ &= \left[\Pi_{(N-L)} Y^* : Y \Pi_{(L+1)} \right] \Pi_{(2L+2)} \\ &= \left[Y \Pi_{(L+1)} \Pi_{(L+1)} : \Pi_{(N-L)} Y^* \Pi_{(L+1)} \right] \\ &= \left[Y : \Pi_{(N-L)} Y^* \Pi_{(L+1)} \right] \end{aligned}$$

이다. 그러므로 행렬 $\left[Y : \Pi_{(N-L)} Y^* \Pi_{(L+1)} \right]$ 는 centro-Hermitian 이다.

이론3^[8] : 만일 행렬 A가 centro-Hermitian이면, 행렬 $U_P^H A U_Q$ 는 실수행렬이다. 여기서

$$U_{2n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I_n & jI_n \\ \Pi_n & -j\Pi_n \end{bmatrix}; \quad A \text{의 크기가 짝수일 경우}$$

$$U_{2n+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I_n & 0 & jI_n \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \\ \Pi_n & 0 & -j\Pi_n \end{bmatrix}; \text{ A의 크기가 홀수일}$$

경우

증명 : $\Pi_p \Pi_p^* = I$ 이라는 사실을 이용하여

$U_p^H A U_Q$ 의 공액복소행렬은

$$(U_p^H A U_Q)^* = U_p^T A^* U_Q^* = U_p^T \Pi_p \Pi_p^* A^* \Pi_Q \Pi_Q^* U_Q^*$$

이고

$$\Pi U^* = U$$

이므로

$$\Pi_p A^* \Pi_Q = A$$

$$(U_p^H A U_Q)^* = U_p^H A U_Q$$

가 성립한다. 그러므로 $U_p^H A U_Q$ 은 실수행렬이다.

III. Matrix Pencil

샘플된 신호 $x(k)$ 는 지수함수의 합으로 모델링된다고 가정하자^[11,12]. 즉,

$$x(k) = \sum_{i=1}^M R_i e^{s_i k} = \sum_{i=1}^M R_i z_i^k \quad (3)$$

여기서 R_i 는 복소진폭이며 d 는 선형 등간격 어레이 센서의 센서간거리, λ 는 신호의 파장,

$$s_i = -\alpha_i + j2\pi \sin \theta_i \quad j2\pi \sin \theta_i, \quad \alpha_i = \text{감쇠지수}, \quad \theta_i =$$

입사각, $e^{s_i k} = z_i$ 이며 $i = 1, 2, 3, \dots, M, k = 1, 2, 3, \dots, N$ 이며 감쇠지수는 중요하지 않다고 가정한다. 목표는 최적 추정값 M, R_i 그리고 $z_i(\theta_i)$ 들을 $x(k)$ 로부터 구해 내는 것이다.

N 개의 샘플 데이터가 있을 경우 행렬 Y 와 Y_a, Y_b 를 다음과 같이 정의한다.

$$Y = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(L) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-L-1) & x(N-L) & \dots & x(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times (L+1)}$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M R_i & \sum_{i=1}^M R_i z_i & \dots & \sum_{i=1}^M R_i z_i^L \\ \sum_{i=1}^M R_i z_i & \sum_{i=1}^M R_i z_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^M R_i z_i^{L+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^M R_i z_i^{N-L-1} & \sum_{i=1}^M R_i z_i^{N-L} & \dots & \sum_{i=1}^M R_i z_i^{N-1} \end{bmatrix}_{(N-L) \times (L+1)} \quad (4)$$

$$Y_a = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(L-1) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-L-1) & x(N-L) & \dots & x(N-2) \end{bmatrix}_{(N-L) \times L} \quad (5)$$

$$Y_b = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \dots & x(L) \\ x(2) & x(3) & \dots & x(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-L) & x(N-L+1) & \dots & x(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times L} \quad (6)$$

여기서 L 은 pencil parameter이고 효과적인 잡음제거를 위하여 $N/3$ 에서 $N/2$ 사이의 값으로 둔다^[7]. 행렬 Y_a 와 Y_b 는 다음과 같이 분해할 수 있다.

$$Y_a = Z_a R_0 Z_b \quad (7)$$

$$Y_b = Z_a R_0 Z_0 Z_b \quad (8)$$

여기서,

$$Z_a = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{(N-L-1)} & z_2^{(N-L-1)} & \dots & z_M^{(N-L-1)} \end{bmatrix}_{(N-L) \times M}$$

$$Z_b = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & \dots & z_1^{(L-1)} \\ 1 & z_2 & \dots & z_2^{(L-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & z_M & \dots & z_M^{(L-1)} \end{bmatrix}_{M \times L}$$

$$Z_0 = \text{diag}[z_1, z_2, \dots, z_M], \quad R_0 = \text{diag}[R_1, R_2, \dots, R_M],$$

이고 $Y^T = Y$ 이다.

그러면 Matrix pencil을 고려하여

$$Y_b - \lambda Y_a = Z_a R_0 [Z_0 - \lambda I] Z_b \quad (9)$$

그러므로 $\lambda = z_i; i = 1, 2, 3, \dots, M,$ 은 일반고유치문제인

$$Y_b - \lambda Y_a \tag{10}$$

의 고유치가 된다. 즉,

$$(YJ_2^T - \lambda YJ_1^T)^T = J_2Y - \lambda J_1Y = 0 \tag{11}$$

여기서, $Y_a = YJ_1^T$, $Y_b = YJ_2^T$

$$J_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}_{L \times (L+1)},$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{L \times (L+1)}$$

이며 식(11)은 다음과 같이 변환된다.

$$J_2Y = \lambda J_1Y \tag{12}$$

$$U^H J_2 U U^H Y U = \lambda U^H J_1 U U^H Y U \tag{13}$$

이론(1,2,3)에 의하여 $U U^H = I$ 이고 $U^H Y U \square X_R$ 이 성립한다. 또는

$$U^H J_2 U X_R = \lambda U^H J_1 U X_R \tag{14}$$

이 성립하며, 다음의 관계식들은 쉽게 증명될 수 있다.

$$\Pi_p \Pi_p = I, \quad \Pi_p U_p = U^*,$$

$$U_p^H \Pi_p = U^T, \quad \Pi_p J_2 \Pi_{p+1} = J_1$$

그러므로 식(14)의 좌측항은

$$U^H \Pi \Pi J_2 \Pi \Pi U X_R = U^H \Pi J_1 \Pi U X_R$$

$$= U^T J_1 U^* X_R$$

$$= (U^H J_1 U)^* X_R \tag{15}$$

이 되며 식(14)는

$$(U^H J_1 U)^* X_R = \lambda U^H J_1 U X_R \tag{16}$$

이다.

$$z_i = e^{j\omega_i T_i} = e^{\frac{d}{\lambda} j 2\pi \sin \theta_i}$$

이며 $Re(z_i) = \cos(\frac{d}{\lambda} 2\pi \sin \theta_i)$,
 $Im(z_i) = \sin(\frac{d}{\lambda} 2\pi \sin \theta_i)$ 이 성립하므로 식 (16)은

$$\{Re(U^H J_1 U) - j Im(U^H J_1 U)\} X_R$$

$$= \{Re(\lambda) + j Im(\lambda)\} \{Re(U^H J_1 U) + j Im(U^H J_1 U)\} X_R \tag{17}$$

이다.

항들을 정리하면,

$$-\tan\left(\frac{d}{\lambda} \pi \sin \theta_i\right) Re(U^H J_1 U) X_R = Im(U^H J_1 U) X_R \tag{18}$$

SNR이 낮은 경우는 X_R 의 SVD(singular value decomposition)을 행하는 것이 유리하며 X_R 의 singular value는 신호공간과 일치하게 된다^[9].

그러므로 $\tan\left(\frac{d}{\lambda} \pi \sin \theta_i\right)$ 를 행렬 $Im(U^H J_1 U) A_s$ 와

$Re(U^H J_1 U) A_s$ 의 일반 고유치문제으로써 구할 수 있다. 여기서 A_s 는 X_R 의 M 개의 최대 고유치이며 M 은 추정 신호의 개수이다. 즉,

$$X_R = U \Sigma V^T$$

여기서 $U = [u_1 u_2 \cdots u_M \cdots]$ 와 V 는 직교 행렬이고 Σ 는 대각선이 σ_i 인 대각행렬이며 $A_s = [u_1 u_2 \cdots u_M]$ 는 singular value $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M$ 들이 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_M \geq \sigma_{M+1}, \dots$ 을 만족하는 행렬이다. 또는

$\tan\left(\frac{d}{\lambda} \pi \sin \theta_i\right)$ 는 행렬 $[Re(U^H J_1 U) A_s]^{-1} Im(U^H J_1 U) A_s$ 의 고유치이다. 일반적으로 A_s 는 정방행렬이 아니므로 $[Re(U^H J_1 U) A_s]^{-1}$ 는 $[Re(U^H J_1 U) A_s]$ 의 pseudo inverse 행렬을 의미한다. 실제로는 얼마나 많은 수의 입사신호가 있는지 알지 못하므로 M 을 정할 때 잡음의 singular value 이하의 값은 0으로 두게 된다. M 을 적절하게 정하는 방법이 [7]에 정리되어 있다.

IV. 알고리즘의 정리

1. 데이터벡터 x 로부터 식 2의 Matrix Pencil Y 를 얻는다.

2. 이론 1로부터 실행렬 $X_R = U^H Y U$ 을 구하거나 또는 이론 2로부터 $X_R = U^H [Y : \Pi_{(N-L)} Y^* \Pi_{(L+1)}] U$ 을 구한다.
3. $\text{Im}(U^H J_1 U)$ 과 $\text{Re}(U^H J_1 U)$ 을 계산한다.
4. X_R 의 SVD를 행하여 M개의 최대 singular value에 해당하는 singular 벡터로 구성된 A_s 를 구한다.
5. $\text{Im}(U^H J_1 U) A_s$ 와 $\text{Re}(U^H J_1 U) A_s$ 의 일반고유치 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_M$ 를 계산한다.
6. $\sin(\theta_i) = \frac{\lambda}{d\pi} \tan^{-1}(\gamma_i)$ 을 계산한다.

V. 실험

그림 1에 계산시간이 비교되어졌다. 신호는 1개의 DOA를 가진다고 가정하였으며 pencil parameter는 $L = (N-1)/2$ 으로 두었다. 각 어레이센서의 수마다

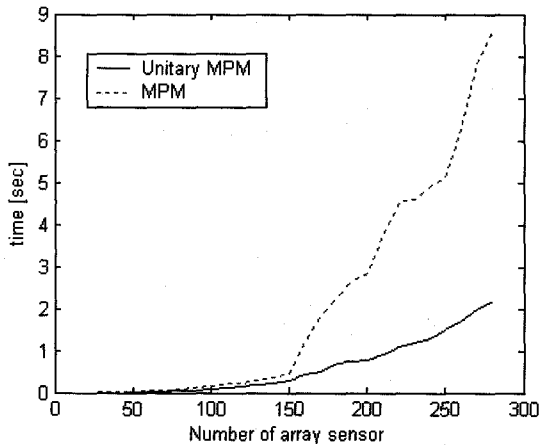


그림 1. 계산 시간의 비교
Fig. 1. Comparison of computation time.

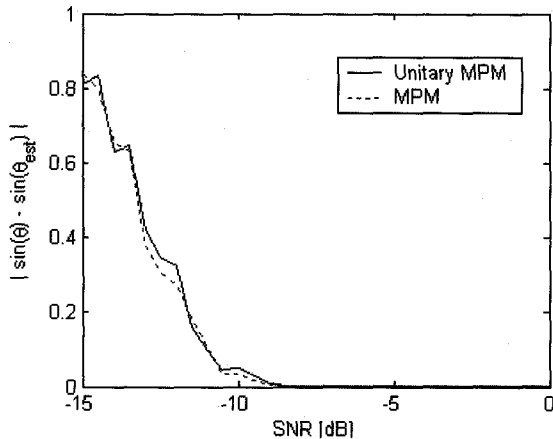


그림 2. SNR이 다른 경우의 Error율 비교
Fig. 2. Resolution performance.

500회씩 반복하여 시간을 측정 하였다. 기존의 Matrix Pencil 방법과 제안된 방법 모두 어레이센서의 수가 증가함에 따라 계산시간은 증가하며 어레이수가 커지면 기존방법의 25%정도로 제안된 방식이 우수함을 알 수 있다. 계산은 펜티엄4-3GHz을 사용했으며 C언어로 코딩 되었다.

그림 2는 SNR이 다른 경우의 기존의 Matrix Pencil 방법과 제안된 방법의 오차를 비교한 것이다. 201개의 센서를 가정 하였으며 각 SNR 마다 300회 반복 실험을 한 결과를 평균을 내었다. 센서간 거리는 반파장, $\pi/10$ 에서 입사하는 신호는 다음과 같다.

$$x(k) = e^{i\pi k \sin(\frac{\pi}{10})} + N_k e^{2\pi i U(0,1)},$$

$$k = 0, 1, \dots, 200.$$

여기서 N_k 는 잡음의 크기이며 U 는 uniform 분포를 가진 랜덤함수이다. 두 경우 모두 유사한 결과를 보여줌을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 Matrix Pencil 방법의 계산량을 줄이기 위하여 unitary 변환을 이용한 Matrix Pencil 방법을 제안하였다. Unitary 변환을 이용하면 복소계산의 Matrix Pencil 방식이 모두 실수 계산으로 바뀌게 되므로 데이터가 큰 경우 25% 정도의 계산량 만으로 같은 결과를 도출할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과, 어레이의 개수가 200개 이상이 되는 경우에 25%-30%정도의 계산량으로 유사한 결과를 도출함을 보여주었다.

참고 문헌

- [1] J.C. Liberti, and T.S. Rappaport, Smart antennas for wireless communications, Upper Saddle River, NJ, Prentica Hall, 1999.
- [2] J Capon, "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," Proc. IEEE, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, Aug.1969.
- [3] R.O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation", IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol.34, no.3, pp. 276-280, 1986
- [4] A. J. Barabell, "Improving the Resolution Performance of Eigenstructure-based Direction

- Finding Algorithm”, Proc. Of the IEEE Int’l Conf. on ASSP 83, pp. 336-339, 1983.
- [5] R. Roy and T. Kailath, “ESPRIT-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques,” IEEE Trans, on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 37, pp. 984-995, July 1986.
- [6] Y. Hua, and T.K. Sarkar, “Generalized pencil-of-function method for extracting poles of an EM system from its transient response”, IEEE trans. on Antennas and Propagation, vol.37, no.2, pp. 229-234, 1989.
- [7] T.K. Sarkar, and O. Pereira, “Using the Matrix Pencil Method to Estimate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.37, no.1, pp. 48-54, 1994.
- [8] K. C. Huang, and C. C. Yeh, “A Unitary Transformation Method for Angle of Arrival Estimation”, IEEE trans. on Signal Processing, vol.39, no.4, pp. 975-977, 1991.
- [9] M. Haardt and J.A. Nossek, “Unitary ESPRIT: How to Obtain Increased Estimation Accuracy with a Reduced Computational Burden”, IEEE trans. on Signal Processing, vol.43, no.5, pp.1232-1242, 1995.
- [10] A. Lee, “Centrohermitian and skew centrohermitian matrices”, Linear algebra and its applications, vol.29, pp.205-210, 1980.
- [11] N. Yilmazer, J.Koh, T.K.Sarkar, “Utilization of a unitary transform for efficient computation in the matrix pencil method to find the direction of arrival”, IEEE trans. on Antennas and Propagation, vol.54, no.1, pp.175-181, 2006.1
- [12] 장우진, 고진환, “4차 cumulant를 이용한 Matrix Pencil Method”, 전자공학회논문지, 제43권 SP-2, pp.87-92, 2006. 3

저 자 소 개



고진환(정회원)
1999년 시라큐스대학교 전기공학 박사졸업
2003년~현재 경상대학교 공과대학 공학연구원 전기전자공학부 조교수

<주관심분야 : 통신, 신호처리, 레이더, 마이크로프로세서>



주위위(학생회원)
2004년 8월 안산과기대 전자공학과 졸업
2006년 9월 경상대학교 전자공학과 석사졸업
2006년 9월~현재 경상대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야 : 어레이 신호처리, 레이더 신호처리>



김태곤(정회원)
1996년 시라큐즈대학교 전자공학 석사 졸업.
2001년 펜실바니아 주립대학 전자공학 박사 졸업.
2001년~2002년 인텔연구소 근무.
2003년~2004년 삼성 디지털미디어 연구소 근무.

2005년~현재 고려대학교 과학기술대학 전자및정보공학부 조교수.

<주관심분야 : 무선통신, 통신 네트워크, 영상 및 통신 신호처리>