

# Elastic Net를 이용한 시간 지연 추정 알고리즘

## Time delay estimation algorithm using Elastic Net

임준석,<sup>1†</sup> 이근화<sup>2</sup>

(Jun-Seok Lim<sup>1†</sup> and Keunwa Lee<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>세종대학교 전자정보통신공학과, <sup>2</sup>세종대학교 국방시스템공학과  
(Received May 3, 2023; revised June 21, 2023; accepted July 4, 2023)

**초 록:** 두 개 수신기에 들어오는 신호 간의 시간 지연 추정 기술은 수중 음향뿐만 아니라 실내 음향 및 로봇틱스에 이르기까지 다양한 분야에서 응용되고 있는 기술이다. 시간 지연 추정 기술에는 수신기 사이 상호 상관으로부터 시간 지연량을 추정하는 방법이 한 기술 부류이고, 수신기 사이의 시간 지연을 파라메트릭 모델링을 하여 그 파라미터를 시스템 인식의 방법으로 추정하는 기술 부류가 있다. 두 부류 중 후자의 경우 시스템의 파라미터 중에서 지연과 직접 관련 있는 파라미터는 전체 중 극히 일부라는 특성이 있다. 이 특성을 이용하여 Lasso 정규화 같은 방법으로 추정 정확도를 높이기도 한다. 그러나 Lasso 정규화의 경우 필요한 정보가 소실되는 경우가 발생한다. 본 논문에서는 이를 보완하기 위해서 Lasso 정규화에 Ridge 정규화를 덧붙인 Elastic Net을 사용한 방법을 제안한다. 제안한 방법을 기존의 일반 상호 상관(Generalized Cross Correlation, GCC) 방법 및 Lasso 정규화를 사용한 방법과 비교하여, 백색 가우시안 신호 원 및 유색 신호원에서도 추정 오차가 매우 적음을 보인다.

**핵심어:** 시간 지연 추정, 디콘볼루션, Lasso 정규화, Ridge 정규화, Elastic Net

**ABSTRACT:** Time-delay estimation between two receivers is a technique that has been applied in a variety of fields, from underwater acoustics to room acoustics and robotics. There are two types of time delay estimation techniques: one that estimates the amount of time delay from the correlation between receivers, and the other that parametrically models the time delay between receivers and estimates the parameters by system recognition. The latter has the characteristic that only a small fraction of the system's parameters are directly related to the delay. This characteristic can be exploited to improve the accuracy of the estimation by methods such as Lasso regularization. However, in the case of Lasso regularization, the necessary information is lost. In this paper, we propose a method using Elastic Net that adds Ridge regularization to Lasso regularization to compensate for this. Comparing the proposed method with the conventional Generalized Cross Correlation (GCC) method and the method using Lasso regularization, we show that the estimation variance is very small even for white Gaussian signal sources and colored signal sources.

**Keywords:** Time delay estimation, Deconvolution, Lasso regularization, Ridge regularization, Elastic Net

**PACS numbers:** 43.60.Jn, 43.60.Mn

## 1. 서 론

일정 거리 떨어져 있는 두 수신기에 수신된 신호간의 지연 시간량을 추정하는 것은 여러 공학 응용에서의 목표물 위치추정 문제나 추적에 쓰이고 있다.<sup>[1-8]</sup> 시간 지연을 추정하는 방법 중에는 두 수신 신호

사이의 상호 상관도를 구하여 그 상관 값이 최대가 되는 시점을 시간 지연량으로 구하는 방법을 근간으로 하는 방법이 있고,<sup>[9]</sup> 두 수신 신호들 사이의 지연 관계를 일종의 유한 임펄스 응답 시스템으로 보고 이 시스템의 임펄스 응답을 구하는 방법이 있다.<sup>[4-8]</sup> 이를 디콘볼루션 방법이라고도 한다. 후자와 같이

†Corresponding author: Jun-Seok Lim (jslim@sejong.ac.kr)

Department of Electrical Engineering, Sejong University, Neung dong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05006, Republic of Korea  
(Tel: 82-2-3408-3299, Fax: 82-2-3408-4329)



Copyright©2023 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시간 지연 추정을 위해서 시스템 모델을 사용하는 경우에 이 추정할 모델에서 극히 소수만이 유의미한 일종의 희소성 채널이 주 대상이 된다. 최근에는 압축센싱 방법<sup>[10]</sup>의 하나인, Lasso 정규화 즉,  $l_1$  정규화된 Least Mean Square(LMS) 방식 희소성 시스템 임펄스 응답 추정 기법을 응용한 시간 지연 추정 기법이 제안되었다.<sup>[11]</sup> 이 방법을 통하여 비교적 낮은 신호 대 잡음 비율에서 시간 지연 추정할 때 기존의 상호 상관을 사용하는 방법이 겪는 갑작스러운 성능 열화 현상인 문턱 현상이 완화됨을 보였다.<sup>[11]</sup> 그러나 위치추정과 같은 시간 지연 추정 응용 분야에서 더 적은 추정 오차가 요구된다. 이는 적은 추정 오차가 더 정확한 위치추정을 의미하기 때문이다.

이를 위해서 본 논문에서는  $l_1$  정규화만을 사용하는 경우의 단점을 보완한 Elastic Net<sup>[12]</sup>을 이용한 시간 지연 추정법을 제안하고, 모의실험을 통해서 상당히 넓은 신호 대 잡음 비율에서 추정 오차를 줄일 수 있음을 보인다.

## II. 지연 신호의 수치 모델링

시간 지연 추정 문제의 신호 모델은 다음과 같다. 두 수신기에 각각 수신된 신호를  $x_i(k)$ ,  $i=1, 2$ 라 한다면, 그 신호의 수치 모델은 다음과 같다.<sup>[11]</sup>

$$x_i(k) = \alpha_i s(k - \tau_i) + n_i(k), \quad (1)$$

여기서  $\alpha_i$ 는 원신호,  $s(k)$ ,가  $i$ 번째 수신기에 도달할 때의 감쇄 계수이고,  $\tau_i$ 는 원신호가  $i$ 번째 수신기에 도달할 때까지의 전파시간이다. 또  $n_i(k)$ 는  $i$ 번째 수신기에 부가된 잡음이다. 이 모델에서  $s(k)$ ,  $n_i(k)$ 는 영 평균이고, 상호 상관이 없는 가우시안 신호이다. 두 수신기 간에 상대적인 시간 지연은,  $\tau_{12} = \tau_1 - \tau_2$ 이다.

1번 수신기를 기준으로 시간 지연을 수식으로 다시 쓰면 다음과 같다.<sup>[11]</sup>

$$x_2(k) = \alpha_{12} s(k - \tau_{12}) + n(k), \quad (2)$$

여기서  $\alpha_{12}$ 는 1번 수신기에 대한 2번 수신기의 이득 값이고,  $\tau_{12}$ 는 1번 수신기 대비 2번 수신기의 시간 지

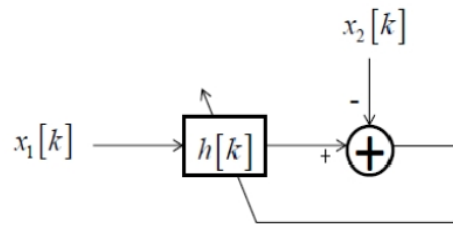


Fig. 1. Time delay estimation modeling by system identification approach.<sup>[11]</sup>

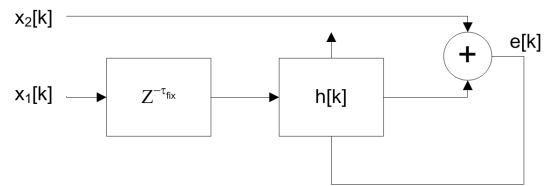


Fig. 2. Practical time delay estimation system diagram.<sup>[11]</sup>

연 값이다.

Eq. (2)와 같은 지연 관계를 시스템으로 보고 이를 추정하는 과정을 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1은 1번 수신기에 수신된 신호에 비해서 2번 수신기에 수신된 신호가 늦게 도착한다는 가정이 내포된 것이다. 다음 Fig. 2와 같이 1번 수신기에 두 수신기 사이의 최대 시간 지연에 해당하는 고정적인 시간 지연,  $\tau_{fix}$ 를 부가하도록 모델을 수정하면 1번 수신기에 비해서 2번 수신기에 수신된 신호가 늦은 경우뿐만 아니라 먼저 도착한 경우도 처리할 수 있다.

## III. Elastic Net 기반 추정 알고리즘

### 3.1 Lasso 정규화를 이용한 시간 지연 추정

앞 절에 두 수신 채널 간 신호의 시간 지연 추정을 시스템 추정의 시각으로 생각할 때, 두 수신 신호 간의 시간 지연을 Fig. 3과 같은 임펄스 응답으로 모형화할 수 있고, 시간 지연 추정을 위해서 Fig. 3과 같은 임펄스 응답을 추정할 후 그 결과로부터 시간 지연 값을 얻을 수 있다.

Fig. 3에 그려진 임펄스 응답을 보면 전체 중에서 극히 일부만이 의미 있는 값을 갖는 특징을 갖고 있다는 것을 알 수 있다. 이런 특징을 지닌 신호를 희소(sparse)신호라고 한다.<sup>[13]</sup>

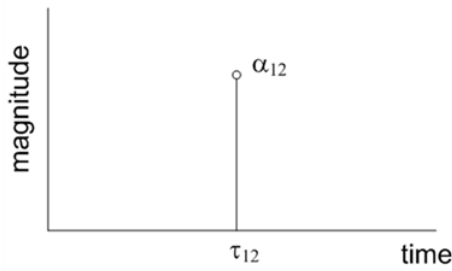


Fig. 3. Time delay channel model between two received signals.<sup>[11]</sup>

이런 신호를 추정할 경우에 일반적인 신호 추정에 많이 사용하는 목적함수인 최소 자승법을 적용할 경우 즉,

$$\min_x \|y - Ax\|^2 \quad (3)$$

를 사용하는 경우는 잡음의 영향으로 참값 외에 많은 유사 해를 추정할 수 있다고 알려져 있다.

희소성을 갖는 신호에 적용하기 위해서 제안된 회귀분석 분야의 한 방법인 Lasso 정규화를 사용해 영향력이 적은 회귀계수 값을 쉽게 0으로 만드는 변수 선택력을 높이는 것을 이용한다.<sup>[11-13]</sup> Fig. 2의 시간 지연 추정을 위해 Lasso 정규화를 사용하는 목표함수는 Eq. (5)와 같다.<sup>[11-13]</sup>

$$\min_{\mathbf{h}} \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{X}_1 \mathbf{h}\|^2 + \lambda \|\mathbf{h}\|_1, \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{x}_2$ 는 수신기2에 수신된 신호로 만든 벡터이다.  $\mathbf{h}$ 은 수신기1과 수신기2 간의 지연 효과 전달함수의 임펄스 응답이다.  $\mathbf{X}_1$ 은 수신기1에 수신된 신호와 전달 임펄스 응답 벡터 사이의 콘볼루션을 계산하기 위해서 수신기1의 신호로 만든 원형 행렬이다. 또 위 식의 상수  $\lambda$ 는  $\mathbf{h}$  벡터의 계수 값 축소 강도를 조절하는 역할을 한다.

### 3.2 Elastic Net을 이용한 시간 지연 추정

3.1에 언급한 Lasso 정규화는 변수 선택을 수행할 수 있지만 정보 손실 및 정확도가 낮은 단점이 있다. 대부분의 변수의 계수를 정확히 0으로 설정하여 변수를 제거하고 여러 변수 간에 상관관계가 있을 때

소수의 변수만 남기기 때문이다. 반면에 또 다른 전통적인 정규화 방법인 Ridge 정규화는 영향력이 적은 변수의 계수를 정확히 0으로 설정하지 않고 가능한 한 0에 가깝게 만들어 그 변수의 영향을 줄인다.

$$\min_{\mathbf{h}} \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{X}_1 \mathbf{h}\|^2 + \lambda \|\mathbf{h}\|^2, \quad (5)$$

여기서 상수  $\lambda$ 는 Ridge 정규화 계수이다.

모델 해석 측면에서 Lasso 정규화는 무의미한 변수를 제거하기 때문에 희소한 시스템의 경우 Ridge 정규화보다 더 강력한 것으로 간주된다. 그러나 Ridge 정규화는 모든 변수를 유지하므로 예측력 측면에서 Lasso 정규화보다 성능이 우수한 경향이 있다.

Elastic Net은 Lasso와 Ridge 정규화를 모두 사용하여 이들의 이점을 결합한 방법이다.<sup>[12]</sup> 높은 영향력을 가진 변수를 선택하고 중요하지 않은 변수의 영향을 최소화하여 과적합을 방지하고, 정보 손실을 최소화하여 모델 해석력과 예측력을 높인다. Elastic Net은 Lasso 정규화와 Ridge 정규화 사이의 가중치를 조정함으로써 변수의 수와 정보 손실에 유연하게 적용할 수 있다.<sup>[12]</sup>

$$\min_{\mathbf{h}} \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{X}_1 \mathbf{h}\|^2 + \alpha \lambda \|\mathbf{h}\|_1 + (1 - \alpha) \lambda \|\mathbf{h}\|^2, \quad (6)$$

여기서  $\alpha$ 는 두 정규화 항의 결합 계수이다. 이 결합 계수 값이 1에 가까워지면 Elastic Net은 Lasso 정규화가 되고, 결합 계수 값이 0에 가까워지면 Ridge 정규화가 된다. 본 논문에서 사용한 코드는 공개된 두 Elastic Net을 참고하여 수정하였다.<sup>[14,15]</sup>

## IV. 모의실험 결과

모의실험을 통해서 제안된 알고리즘의 추정 정확도의 우수성을 다른 알고리즘들과 비교해 보았다. 이를 위해서 두 가지 종류의 신호 환경에서 반복 실험을 하였다.

첫 번째 비교실험은 신호원을 백색 정규 분포를 갖는 광대역인 신호<sup>[4,11]</sup>로 가정하고, 1번 수신기와 2번 수신기 사이에 10 신호 표본만큼 시간 지연이 있

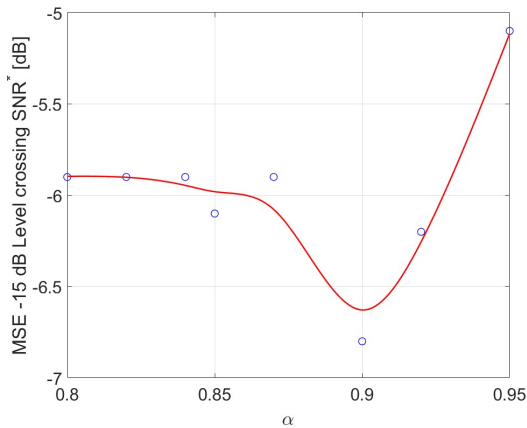


Fig. 4. (Color available online)  $\alpha$  Selection curve. (O: experiment result, red solid line: approximation curve).

SNR\*: Signal To Noise Ratio

다고 설정하였다. 그리고 각 수신 신호에 각각 신호 원과 상관이 없는 불규칙 잡음을 부가하였다.

두 번째 비교실험을 위한 신호는 첫 번째 실험에 대한 상대적 협대역 신호 또는 음성 및 수중 포유류 신호 등의 유사 신호로서 유색 신호원<sup>[4,11]</sup>을 가정하고 발생시켰다. 이를 위해서  $s_d(k) = 0.7s_d(k) + w(k)$ 인 관계식을 만족시키는 1차 Autoregressive 과정인 신호를 발생하여 사용하였다. 나머지 실험 환경은 첫 번째 실험과 같게 설정하였다.

각각의 비교실험에서 제안한 방법과 함께 시간 지연 추정 분야에서 전통적으로 유명한 방법인 일반 상호 상관 Generalized Cross Correlation(GCC)방법,<sup>[9]</sup> Lasso 정규화를 사용한 희소 신호 처리를 통해 시간 지연 추정하는 방법<sup>[11]</sup> 및 Eq. (6)에서  $\alpha=0$ 인 Ridge 정규화를 사용한 시간 지연 추정하는 방법<sup>[12]</sup>과 비교하였다. 두 방법을 각 신호 대 잡음비에 대해서 500회씩 반복 시행하여 결과를 얻었다. 추정 성능 비교를 위해서 참 지연 값과 추정 지연 값 사이의 차이를 지연 시간 추정 오차라고 하고, 이 지연 시간 추정의 평균 자승 오차(Mean Square Error, MSE)를 각 신호 대 잡음비에 대해서 그래프로 그렸다.

위 두 실험을 실행하기에 앞서 실험을 통해서 Eq. (6)의  $\alpha$  값을 결정하였다. 이 실험을 위해서 우선 추정하려는 시간 지연의 임펄스 응답이 Fig. 3에서 많이 달라지는 않는다는 가정, 즉 매우 희소성 높은 임펄스 응답을 갖는다는 가정하에  $\alpha$  값을 0.95부터 0.8

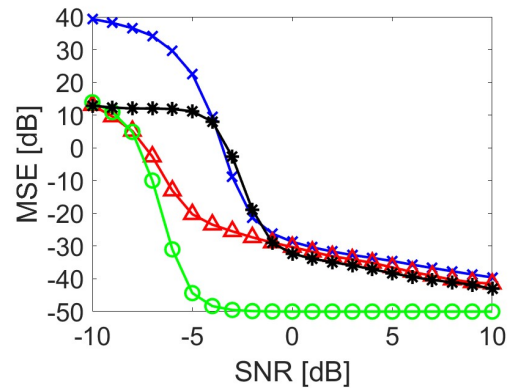


Fig. 5. (Color available online) Performance comparison in case of white gaussian signal source (-x-: GCC, -△-: Lasso regularized method, -\*-\*: Ridge regularized method, -O-: proposed method).

사이의 여러 값에서 신호 대 잡음비를 10 dB에서 -10 dB로 바뀌가면서 앞의 첫 번째 실험의 설정으로 실험한 후 MSE를 구하였다. 여러 번의 실험 결과들로부터 알맞은  $\alpha$  값을 결정하기 위해서 MSE가 -15 dB 보다 열화되는 신호 대 잡음비 값을 비교하였다. 이 신호 대 잡음비 값이 0 dB보다 더 낮을수록 우수한 성능을 내는 것으로 판단할 수 있기 때문이다. 이 실험 결과 데이터들과 그 실험 데이터로부터 얻은 근사식 곡선을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 결과로부터 앞서 첫 번째와 두 번째 비교실험을  $\alpha=0.9$ 로 설정하고 실시하였다.

그리고 Eq. (6)는 Eq. (4)에서  $l_1$ -norm의 영향을 줄이고  $l_2$ -norm의 영향을 좀 추가하는 것으로 해석해서 본 논문의 비교실험에서 사용한  $\lambda$  값은 Eq. (4)과 같은 식을 기본 식으로 사용한 Reference [11]과 같이 0.1로 설정하였다.

Fig. 5는 첫 번째 실험의 결과를 비교한 그림이다. 이 그림으로 볼 때 제안된 방법이 -6 dB까지는 MSE 성능이 제일 우수함을 알 수 있다. 그리고 상대적인 성능 비교를 위해서 MSE 기준을 -15 dB로 설정한다면, 제안한 방법이 -6.8 dB에서 기준 MSE와 교차 되고, Lasso 기반 시간 추정 방법은 -5.8 dB에서 기준선을 지난다. 또 Ridge 기반 시간 추정 방법은 -2.2 dB에서 기준선을 지난다. 그리고 GCC는 -2.6 dB에서 기준선을 지난다. 따라서 제안한 방법이 Lasso에 비해서 신호 대 잡음비가 약 1 dB 정도 더 낮고, Ridge에 비해서 신호 대 잡음비가 약 4.6 dB 정도 더 낮으며, GCC

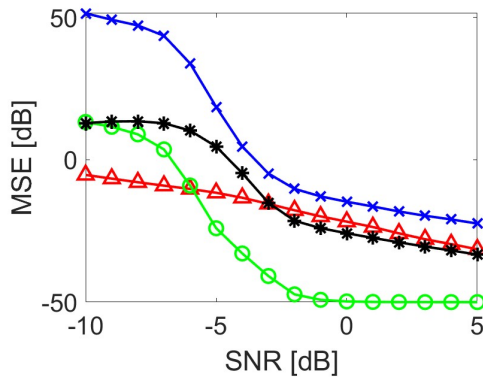


Fig. 6. (Color available online) Performance comparison in case of colored signal source ( $-x-$ : GCC,  $-\Delta-$ : Lasso regularized method,  $-*-$ : Ridge regularized method,  $-O-$ : proposed method).

에 비해서는 4.2 dB 정도 더 낮았다. 따라서 백색 신호원에서 제안한 방법이 상대적으로 넓은 동작 범위에 걸쳐 낮은 추정 오차로 추정할 수 있어서 시간 지연을 통해 위치를 추정할 때 상대적으로 더 정확한 위치추정 결과를 제공할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6는 두 번째 실험인 유색 신호원에 대한 실험 결과이다. 이 경우도 제안된 방법이 약 -5 dB까지는 MSE 성능이 제일 우수함을 알 수 있다. 그리고 실험1과 마찬가지로 성능 비교를 위해서 기준 MSE를 -15 dB로 설정한다면, 제안한 방법이 -5.6 dB에서 기준 MSE를 통과하고, Lasso 기반 시간 추정 방법은 -3.2 dB에서 기준선을 지난다. 또 Ridge 기반 시간 추정 방법은 -3.0 dB에서 기준선을 지난다. 그리고 GCC는 0 dB에서 기준선을 지난다. 따라서 제안한 방법이 Lasso에 비해서 신호 대 잡음비가 약 2.4 dB 정도 더 낮고, Ridge에 비해서 신호 대 잡음비가 약 2.6 dB 정도 더 낮으며, GCC에 비해서는 5.6 dB 정도 더 낮았다. 따라서 유색 신호원에서도 제안한 방법이 상대적으로 넓은 동작 범위에 걸쳐 낮은 추정 오차로 추정할 수 있어서 시간 지연을 통해 위치를 추정할 때 상대적으로 더 정확한 위치추정 결과를 제공할 수 있음을 알 수 있다.

마지막으로 두 실험을 하면서 얻은 평균 수행시간을 Table 1에 정리하였다. 두 실험에서 450 샘플을 데이터 한 묶음마다 시간 지연 추정값 하나를 얻었다. 이런 수행은 모두 매트랩 환경에서 이루어졌고, 매트랩의 수행시간 측정 명령어를 사용하여 평균 수

Table 1. Comparison of the average estimation time.

Algorithm	Average time to estimate a time delay from a batch of 450 data samples
GCC <sup>[9]</sup>	0.27 ms
Lasso <sup>[11]</sup>	0.33 ms
Ridge <sup>[12]</sup>	0.32 ms
Proposed method	0.41 ms

행시간을 구했다.

Table 1에서 보면 제안된 방법이 다른 방법과 비슷한 수행 속도를 보임을 알 수 있다. 물론 심도 있는 최적화를 통해 수행시간을 더 단축할 여지는 있다. 그러나 새 방법을 제안하려는 본 논문의 목적상 고속화는 더 진행하지 않고, 다른 방법과 비교하여 추정 속도 수준을 가늠할 수 있는 정보만을 제공하려고 한다.

## V. 결론

두 수신기에 입력되는 신호에 간의 지연 시간량을 추정하기 위해 Elastic Net을 사용한 새로운 방법을 제안하였다. 이 방법은 Lasso 정규화와 Ridge 정규화를 조화시키는 방법으로써 기존의 Lasso 정규화를 사용하여 희소 신호 처리를 바탕으로 시간 지연을 추정하는 기법에 비해서 상대적으로 더 넓은 동작 신호 대 잡음 비율 범위를 제공하고 또 백색 신호원이나 유색 신호원 모두에 대해서 신호 대 잡음비 약 -5 dB까지도 추정 오차가 매우 낮아서 정확성 높은 추정 결과를 제공할 수 있음을 보였다.

## 감사의 글

이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (20-106-B00-003).

## References

1. H.-R. Park and J.-H. Shin, "Eigen-analysis based super-resolution time delay estimation algorithms for spread spectrum signals" (in Korean), *J. KICS*, **38**,

- 1013-1020 (2013).
2. J.-H. Shin, H.-R. Park, and E. Chang, "An ESPRIT-based super-resolution time delay estimation algorithm for real-time locating systems" (in Korean), *J. KICS*, **38**, 310-317 (2013).
  3. J.-H. Shin, S.-I. Myong, E. Chang, and H.-R. Park, "A super-resolution time delay estimation algorithm for spread spectrum signals" (in Korean), *J. KICS*, **37**, 119-127 (2012).
  4. J. Lim and W. Hong, "An adaptive time delay estimation method based on canonical correlation analysis" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **32**, 548-555 (2013).
  5. P. Feintuch, N. Bershad, and F. Reed, "Time delay estimation using the LMS adaptive lter-dynamic behaviour," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* **29**, 571-576 (1981).
  6. K. C. Ho, Y. T. Chan, and P. C. Ching, "Adaptive time-delay estimation in nonstationary signal and noise power environments," *IEEE Trans. Signal Process.* **41**, 2289-2299 (1993).
  7. H. C. So, P. C. Ching, and Y. T. Chan, "A new algorithm for explicit adaptation of time delay," *IEEE Trans. Signal Process.* **42**, 1816-1820 (1994).
  8. J. Koh, H. Lee, S. B. Han, and J.-h. Jeon, "Time delay estimation using de-convolution," *J. KICS*, **41**, 1692-1699 (2016).
  9. G. C. Carter, *Coherence and Time Delay Estimation: An Applied Tutorial for Research, Development, Test and Evaluation Engineers* (IEEE press, New York, 1993), pp. 1-506.
  10. R. Baraniuk, "Compressive sensing," *IEEE Signal Process. Mag.* **24**, 118-124 (2007).
  11. J. Lim and M. Cheong, "Time delay estimation between two receivers using BPD (basis pursuit denoising)" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **36**, 285-291 (2017).
  12. H. Zou and T. Hastie, "Regularization and variable selection via the elastic net," *J. R. Statist. Soc. B*, **67**, 301-320 (2005).
  13. R. Tibshirani, "Regression shrinkage and selection via the Lasso," *J. R. Statist. Soc. B*, **58**, 279-289 (1996).
  14. *Solving the Weighted Nonnegative Elastic Net by two different methods*, [https://github.com/tiepvupsu/WNE\\_net](https://github.com/tiepvupsu/WNE_net), (Last viewed February 6, 2023).
  15. *SpaSM, a Matlab toolbox for performing sparse regression, classification and principal component analysis*, <http://www2.imm.dtu.dk/projects/spasm/>, (Last viewed February 6, 2023).

## 저자 약력

### ▶ 임 준 석 (Jun-Seok Lim)



1986년: 서울대학교 전자공학과 학사 졸업  
 1988년: 서울대학교 전자공학과 석사 졸업  
 1996년: 서울대학교 전자공학과 박사 졸업  
 1996년 7월 ~ 1997년 10월: LG종합기술원  
 1998년 ~ 현재: 세종대학교 전자정보통신공학과 교수

### ▶ 이 근 화 (Keunhwa Lee)



2002년: 서울대학교 조선해양공학과 학사  
 2006년: 서울대학교 조선해양공학과 박사  
 2006년 ~ 2014년: 서울대학교 연구교수  
 2014년 ~ 현재: 세종대학교 국방시스템공학과 부교수