

LASSO를 사용한 시간 지연 추정 알고리즘

임준석*, 편용국°, 최석임*

Time Delay Estimation Using LASSO (Least Absolute Selection and Shrinkage Operator)

Jun-Seok Lim*, Yong-Guk Pyeon°, Seok-Im Choi*

요 약

두 개 센서에 도래하는 신호 간의 시간 지연을 추정 방법에는 여러 가지가 존재한다. 그 중에서 채널 추정 기법을 기반으로 한 방법의 경우는 두 센서에 입력되는 서로 다른 신호간의 상대적인 지연을 채널의 임펄스 응답처럼 추정하도록 되어 있다. 이 경우에는 해당 채널의 특성이 희박 채널의 특성을 가지고 있다. 기존의 방법들은 채널의 희박성을 이용하지 못하고 있는 방법이 대부분이다. 본 논문에서는 채널의 희박성을 이용하기 위하여 희박 신호 최적화 방법의 하나인 LASSO 최적화를 사용한 시간 지연 추정 방법을 제안한다. 제안한 방법을 기존의 방법과 비교하여, 백색 가우시안 신호원에서는 약 10dB 이상의 성능 개선 결과를 보이고, 유색 신호원에서도 갑자기 추정성능이 열화되는 현상이 없음을 보인다.

Key Words : Time delay estimation, Sparse signal processing, LASSO

ABSTRACT

In decades, many researchers have studied the time delay estimation (TDE) method for the signals in the two different receivers. The channel estimation based TDE is one of the typical TDE methods. The channel estimation based TDE models the time delay between two receiving signals as an impulse response in a channel between two receivers. In general the impulse response becomes sparse. However, most conventional TDE algorithms cannot have utilized the sparsity. In this paper, we propose a TDE method taking the sparsity into consideration. The performance comparison shows that the proposed algorithm improves the estimation accuracy by 10 dB in the white gaussian source. In addition, even in the colored source, the proposed algorithm doesn't show the estimation threshold effect.

I. 서 론

두 개의 떨어져 설치된 센서에 도달하는 신호의 상호 시간 지연을 추정하는 것은 목표물 위치 추정 문제나 목표물 추적 및 통신에서의 동기화에 이르기까지

다방면에서 쓰이고 있다^[1-8]. 일반적인 두 센서에 도달하는 신호의 모델은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x(k) &= s(k) + n_1(k), \\ y(k) &= \alpha s(k - D) + n_2(k), \end{aligned} \quad (1)$$

* 본 논문은 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다. (UD130015DD)

♦ First Author : Sejong University Department of Electronic Engineering, jslim@sejong.ac.kr, 종신회원

° Corresponding Author : Gangwon Provincial University Department of Information and Communication, pyk12@naver.com, 정회원

* Korea Polytechnic Gangneung campus Department of Electronic Communication Engineering, im007@kopo.ac.kr

논문번호 : KICS2014-06-247, Received June 29, 2014; Revised September 3, 2014; Accepted September 17, 2014

여기서 $s(k)$ 는 미지의 신호원이고, $n_1(k)$ 와 $n_2(k)$ 는 영 평균 백색 잡음이고, 신호원과는 통계적으로 독립이다. 알파값은 두 센서 입력 사이의 크기 차이를 나타내기 위한 감쇄 계수이다. 이 모델로부터 지연 시간 추정이란 위 식의 'D' 값을 추정하는 것을 의미한다. 이를 추정하기 위한 여러 방법 중에는 유한 임펄스 응답(FIR) 필터를 사용하는 적응 신호처리적 방법들이 있다⁴⁻⁸⁾. 이 중에서는 least mean square time delay estimator (LMSTDE)⁹⁾는 Widrow의 LMS알고리즘¹⁰⁾을 적용한 방법으로 많은 적응 필터형 시간 지연 추정방법의 기준 방법이다. 다른 한편으로는 필터 계수를 지연 시간 값의 함수로 제한한 방법도 있다^{7,8)}.

기존의 방법에서는 필터 모델을 이용하여 지연값을 추정하는 것에 목표를 두고 연구되어 왔다. 그러나 위 모델에서 확인할 수 있듯이 추정할 필터 모델에서 유의미한 계수가 유일한 경우인 것을 알 수 있다. 필터 모델을 이용할 때 이 사실까지 이용하는 방법은 의미가 있는 시도일 것이다. 이런 가정을 바탕으로 필터의 계수를 추정하는 방법이 최근 많이 연구되고 있다. 이 연구 분야에서는 미지 시스템의 임펄스 응답이 전체 차수 중 일부만이 의미 있는 값을 갖는다는 희박성을 띤다는 가정을 바탕으로 필터 계수를 추정하는 연구가 진행되고 있다. 초기 연구에서는 활동성이 있는 필터의 탭들을 경험적으로 선택하는 방법이 주가 되었다¹¹⁻¹³⁾. 또 부분 적응 필터방법^{14,15)} 및 Proportionate Normalized LMS (PNLMS) 같은 비례 적응 필터 방법 등이 함께 연구되었다¹⁶⁾.

최근에는 압축센싱 방법¹⁷⁾ 등에서 출발한 시스템 임펄스 응답 추정 기법이 연구되고 있다. 이외에도 II 정규화된 LMS 방식 시스템 임펄스 응답 추정 기법도 제안되었다¹⁸⁾.

본 논문에서는 Tibshirani의 LASSO 방법¹⁹⁾을 사용한 시간 지연 추정에 적용 가능성을 살펴보고자 한다. 이 논문에서는 일반적인 LMS와 서로 비교를 통해서 그 성능을 비교 하려고 한다.

II. 시간 지연 신호의 수치 모델링

이 장에서는 시간지연 신호 모델링에 자주 쓰이는 두 가지 모델을 설명한다. 그 첫째는 이상적인 모델이고, 둘째가 실제 환경을 좀 더 고려한 실제 모델이다¹²⁰⁾.

2.1 이상적 모델

전통적인 시간지연추정 문제에 많이 쓰이는 간단한

신호 모델은 다음과 같다. 두 채널에서 각각 수신된 신호를 $x_i(k), i=1,2$,라 한다면, 그 신호의 수치 모델은 다음과 같다.

$$x_i(k) = \alpha_i s(k - \tau_i) + n_i(k). \quad (2)$$

여기서 α_i 는 원신호, $s(k)$,가 i 번째 채널에 도달할 때의 감쇄 계수이고, τ_i 는원신호가 i 번째 채널에 도달할 때까지의 전파시간이다. 또 $n_i(k)$ 는 i 번째 채널에 부가된 잡음이다. 이 모델에서 $s(k)$, $n_i(k)$ 는 영평균이고, 상호상관이 없고, 시간에 따라 통계적 성질이 변하지 않는 가우시안 신호이다. 두 채널간의 상대적인 시간 지연은, $\tau_{12} = \tau_1 - \tau_2$ 이다.

2.2 이상적 모델로부터 얻은 두 수신 신호간 임펄스 응답

원 신호원과 두 수신 채널까지의 시간 지연을 수식으로 다룬 식(1)을 수신된 두 신호만으로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$x_2(k) = \alpha_{12} s(k - \tau_{12}) + n(k). \quad (3)$$

여기서 α_{12} 는 1번 채널에 대한 2번 채널의 이득값이고, τ_{12} 는 1번 채널 대비 2번 채널의 시간 지연값이다. 일반적으로 시간 지연 추정 알고리즘은 1번 및 2번 채널에 수신된 신호간의 시간 지연을 구하는 것이므로 바로 τ_{12} 를 구하는 것이라고 할 것이다. 이런 관계를 이용하면 시간 지연 추정을 다음과 같이 시스템 인식의 측면으로 다시 표현할 수 있다.

위 모델에서 추정하는 블랙박스는 다음 그림과 같은 임펄스 응답이 된다.

그러나 위 그림은 항상 1번 채널에 수신된 신호에 비해서 2번 채널에 수신된 신호가 늦다는 가정이 들어간 것이므로 다음과 같이 1번 채널에 고정적인 시간 지연, τ_{fix} 를 부가하도록 모델을 수정하면 1번 채널에 비해서 2번 채널에 수신된 신호가 늦는 경우 뿐만

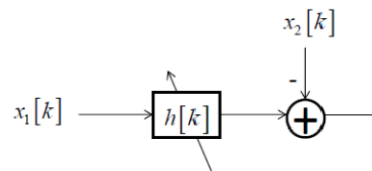


그림 1. 시스템 인식 방식으로 본 시간 지연 추정
Fig. 1. Time delay estimation modeling by system identification approach.

아니라 앞선 경우도 처리할 수 있다. 단 고정적으로 부가하는 지연 시간 값으로 추정할 수 있는 지연 시간의 범위가 $-\tau_{\text{fix}}$ 에서 τ_{fix} 까지로 고정되게 된다.

III. 희박 신호 추정 적용 가능성

앞 절에 두 수신 채널간 신호의 시간 지연 추정을 시스템 추정의 시각으로 생각할 때, 두 수신 신호간의 시간 지연을 그림 2와 같은 임펄스 응답으로 모델링할 수 있고, 시간 지연 추정을 위해서 그림 2와 같은 임펄스 응답을 추정할 후 그 결과로부터 시간 지연값을 얻을 수 있다.

그림 2에 그려진 임펄스 응답을 보면 전체 중에서 극히 일부만이 의미 있는 값을 갖는 특징을 갖고 있다는 것을 알 수 있다. 이런 특징을 지닌 신호를 희박(sparse)신호라고 한다^[21].

이런 신호를 추정할 경우에 일반적인 신호 추정에 많이 사용하는 목적함수인 l_2 정규화 최소 자승법을 적용할 경우 즉,

$$\min_x \|y - Ax\|^2 \quad \text{s.t.} \quad \|x\|^2 \leq t, \quad (4)$$

를 사용하는 경우는 잡음의 영향으로 참 값 외에 많은 유사 해를 추정할 수 있다. 이는 다음 그림으로부터 알 수 있다.

위 그림에서 위 목적함수의 참값은 두 원이 접하는 점 x^* 가 참값이지만 잡음이 존재할 경우 x^* 점 외에도

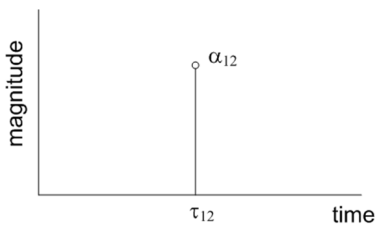


그림 2. 시간 지연 추정 모델에서 두 수신 신호 간 전달 함수
Fig. 2. Time delay channel model between two received signals.

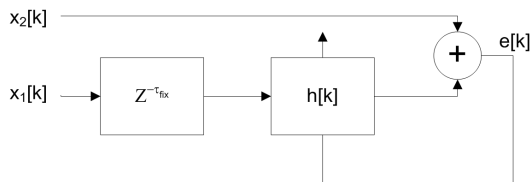


그림 3. 현실적인 시간 지연 추정 시스템
Fig. 3. Practical time delay estimation system diagram.

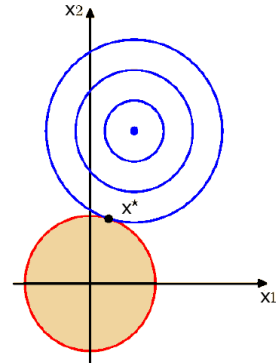


그림 4. l_2 정규화 최소 자승법의 해와 제한 구역간의 관계
Fig. 4 Relation between the solution and constraint in l_2 regularized least square.

원 접점 주위에 많은 유사 근들이 존재하기 매우 쉽다. 따라서 많은 유사 근들이 참값 주변에 나타나게 되어 참값만을 얻기 힘들어 진다. 이에 반해서 다음과 같은 l_1 정규화 최소 자승법을 목적함수로 사용할 경우 즉,

$$\min_x \|y - Ax\|^2 \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N |x_i| \leq t, \quad (5)$$

를 사용할 경우는 앞서의 정규화된 최소 자승법을 목적함수로 사용하는 경우보다 유사 해를 추정할 가능성이 적어진다. 다음 그림으로부터 알 수 있다.

위 그림에서 위 목적함수의 참값은 원과 사각형의 꼭짓점이 접하는 점 x^* 가 참값이다. 이 경우 잡음이 존재할 경우에도 그림 4 때와 달리 x^* 점 외에 유사 근들이 존재하기 쉽지 않다. 따라서 희박 신호 추정에 더 유리하다고 할 수 있다.

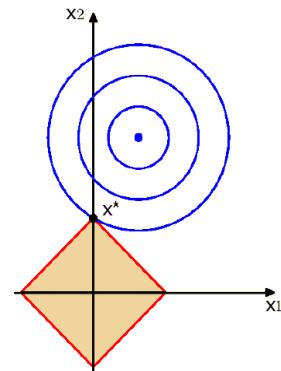


그림 5. l_1 정규화 최소 자승법 자승법의 해와 제한 구역간의 관계.
Fig. 5. Relation between the solution and constraint in l_1 regularized least square.

IV. 추정 알고리즘 정리

3장에서 검토한 것 같이 두 센서에 수신된 두 신호 간의 시간 지연을 추정하는 것을 회박 신호를 추정하는 문제가 된다는 것을 알 수 있다.

회박 특성을 갖는 신호에 적용하기 위해서 제안된 회귀분석 분야의 한 방법인 LASSO 회귀는 회귀계수 축소를 통해 예측 정확도를 높이고 동시에 영향력이 적은 회귀계수 값을 쉽게 0으로 만드는 변수 선택의 기능이 있어 해석력을 높여준다¹⁹⁾. 따라서 LASSO 회귀를 본 논문과 같은 Sparse 시스템 추정에 적용할 때도 상대적으로 우수한 추정 성능이 예상된다.

LASSO의 목표함수는 식(5)와 같다¹⁹⁾. 이를 본 논문에 적용하기 위해서 다음과 같이 바꿔 쓴다.

$$\min_{\mathbf{h}} \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{X}_1\mathbf{h}\|^2 \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N |h_i| \leq t, \quad (6)$$

여기서 \mathbf{x}_2 는 채널2에 수신된 신호들로 이뤄진 벡터이다. \mathbf{h} 은 채널1과 채널2간의 전달함수의 임펄스 응답 벡터이다. h_i 는 신호 벡터 \mathbf{h} 중 i 번째 성분값이다. \mathbf{X}_1 은 채널1에 수신된 신호와 전달 함수 임펄스 응답 벡터 \mathbf{h} 간의 콘볼루션을 행렬과 벡터곱으로 계산하기 위해서 채널1에 수신된 신호들로 만든 원형 행렬(circular matrix)이다. 또 위 식의 제약조건인 양의 실수 t 는 \mathbf{h} 벡터 내의 계수 값에 대하여 축소 정도를 조정하는 조절 모수이다. 이 조절 모수 t 값이 줄어들면 \mathbf{h} 벡터 내에 중요하지 않은 계수 값은 축소되면서 순서대로 0으로 만들어져 계수가 선택되는 효과가 생긴다. 조절 모수 t 값이 충분히 커지면 \mathbf{h} 벡터 내에 계수 값에 대한 제약이 없으므로 LASSO 추정 결과가 최소자승 추정 결과에 접근하게 된다.

위와 같은 목적함수는 최근 compressed sensing 분야에서 활발하게 사용하는 목적함수이다²²⁻²⁵⁾. 위 목적함수를 푸는 툴들이 몇몇 발표되어 사용되고 있다. 그중에는 MOSEK²⁶⁾ PDCO-CHOL²⁷⁾, PDCOLSQR²⁷⁾, and l_1 -magic²²⁾이 있다.

본 논문에서는 SPGL1을 사용하였다²⁸⁾. 그 이유는 SPGL1이 계산법 면에서 보다 효과적인 툴이라는 것이 잘 알려져 있기 때문이다.

V. 모의 실험 결과

모의 실험을 위해서 두 수신 채널을 위한 신호열을 두 종류로 발생시킨다.

첫 번째 비교실험을 위한 신호발생을 위해서 첫 번째 채널 신호 $x_1(k)$ 는 백색 가우시안 불규칙 신호로 발생 시켰다. 두 번째 채널 신호는 $x_1(k)$ 과 10 샘플 뒤진 신호로 모델 하였다. 즉, $x_2(k)=x_1(k-10)$ 이다. 각 신호 $x_1(k)$ 와 $x_2(k)$ 에는 두 백색 가우시안 잡음, $n_1(k)$ 과 $n_2(k)$ 가 각각 부가되었다. 이들 부가 잡음들은 서로 상관관계가 없도록 하였다.

두 번째 비교실험을 위한 신호열은 신호 중 하나인 $x_1(k)$ 는 1차 AR과정인 신호로써, $s_0(k)=0.7s_0(k)+w(k)$, 인 관계식을 만족시키는 것으로 사용하였다. 이로써 음원이 유색 신호원의 성질을 갖도록 하였다. 나머지 스펙은 첫 번째 비교 실험 때와 같도록 하였다. 그리고 각 실험에서 부가 잡음 신호는 원하는 신호대 잡음비가 되도록 크기를 변화 시켰다. 각 모의 실험에서는 신호대 잡음비를 -20 dB부터 5dB사이에서 매 1dB씩 달라지도록 하였다.

각 각의 비교 실험에서 제안한 방법과 함께 시간 지연 추정 분야에서 전통적으로 유명한 두 방법인 GCC방법²⁹⁾과 적응 고유치분해방법²⁰⁾ 및 LASSO류가 아닌 다른 종류의 회박 신호 추정 방법으로 여러 연구자들에 의해 참고 되고 있는 Reweighted Zero-Attracting LMS³⁰⁾를 적용한 경우를 동등하게 비교하였다. 네 방법을 각 신호 대 잡음비에 대해서 100회씩 반복 시행하여 결과를 얻었다. 추정 성능 비교를 위해서 지연 시간 추정의 평균 자승 오차를 각 신호 대 잡음비에 대해서 그래프로 그렸다.

그림 6은 첫 번째 실험의 결과를 비교한 그림이다. 이 그림으로 볼 때 제안된 방법이 0dB이상에서 GCC 방법에 비해서 10dB 정도 성능 개선을 보이고, 다른 두 방법에 비해서는 20dB 정도의 성능 개선을 보인다. 또 추정 성능 곡선을 보면 모두 일정 신호 대 잡음비 이하에서 성능이 갑자기 열화되는 현상을 관찰할 수 있는데, 이 현상이 다른 세 방법에 비해서 낮은 신호 대 잡음비에서 일어난다. 이를 평가하기 위해서 -20dB를 기준 선으로 가정 했을 때 제안된 방법은 약 -12dB에 이 기준선을 통과하고, GCC는 약 -6dB에서 기준선에 도달한다. 나머지 두 방법은 약 -2dB에서 기준선을 지난다. 따라서 제안한 방법이 더 넓은 사용범위를 가지고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과를 종합할 때 백색 광대역 신호원에 대한 시간 지연 추정 성능은 제안 방법이 다른 세 방법들에 비해서 월등한 성능을 내고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 두 번째 실험의 결과를 비교한 그림이다. 이 그림으로 볼 때 유색 신호원에 대한 시간 지연 추정 성능은 적응 고유치분해방법에 비해서는 월등한

VI. 결 론

두 센서에 수신된 신호가 시간 지연을 추정하기 위한 다른 방법으로 희박 신호처리 방법을 적용한 추정 방법을 제안하였다. 이 방법은 기존의 시간 지연 추정 방법들이 두 센서 사이의 지연 채널 모델이 희박채널이라는 것을 충분히 이용하지 못하고 있는데 반해서, 그 희박성을 적극적으로 이용하고자 하는 방법이다. 본 논문에서는 희박 신호 처리 방법의 하나인 LASSO 모델을 사용하여 추정 알고리즘을 만들고 기존에 쓰던 대표적인 시간 지연 추정법들 및 다른 종류의 희박 신호 처리 방법인 Reweighted Zero-Attracting LMS를 적용한 경우와 서로 비교하였다. 그 결과 백색 가우시안 신호의 경우 약 10dB에서 20dB사이의 성능 개선을 보였고, 유색 신호원의 경우도 갑자기 추정 성능이 갑자기 저하되는 현상이 훨씬 줄어드는 것을 관측할 수 있었다. 따라서 제안한 추정법이 우수한 추정 결과를 산출함을 알 수 있었다.

References

- [1] H.-R. Park and J.-H. Shin, "Eigen-analysis based super-resolution time delay estimation algorithms for spread spectrum signals," *J. KICS*, vol. 38, no. 12, pp. 1013-1020, Dec. 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," *J. KICS*, vol. 38, no. 4, pp. 310-317, Apr. 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," *J. KICS*, vol. 37, no. 2, pp. 119-127, Feb. 2012.
- [4] J. Lim and W. Hong, "An adaptive time delay estimation method based on canonical correlation analysis," *J. Acoustic. Soc. Korea*, vol. 32, no. 6, pp. 548-555, Nov. 2013.
- [5] P. L. Feintuch, N. J. Bershad, and F. A. Reed, "Time delay estimation using the LMS adaptive iter-dynamic behaviour," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol. 29, no. 3, pp. 571-576, Mar. 1981.

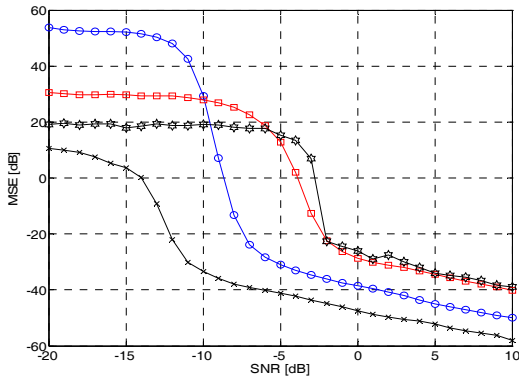


그림 6. 백색 가우시안 신호원을 사용한 시간 지연 추정 성능 비교 (-x: LASSO를 사용한 경우, -o: GCC를 사용한 경우, -□: 적응 고유치분해방법을 사용한 경우, -☆: Reweighted Zero-Attracting LMS를 사용한 경우).

Fig. 6. Performance comparison in case of white gaussian signal source (-x: LASSO, -o: GCC, -□: Eigenvector decomposition, -☆: Reweighted Zero-Attracting LMS).

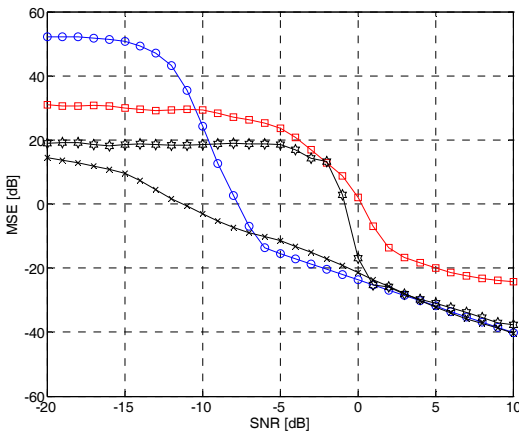


그림 7. 유색 신호원을 사용한 시간 지연 추정 성능 비교 (-x: LASSO를 사용한 경우, -o: GCC를 사용한 경우, -□: 적응 고유치분해방법을 사용한 경우, -☆: Reweighted Zero-Attracting LMS를 사용한 경우).

Fig. 7. Performance comparison in case of colored signal source (-x: LASSO, -o: GCC, -□: Eigenvector decomposition, -☆: Reweighted Zero-Attracting LMS).

성능 발휘하고 있고 GCC 방법 및 Reweighted Zero-Attracting LMS과는 거의 유사한 성능을 내고 있음을 보이고 있다. 그러나 다른 세 방법이 공통으로 보이는 갑작스런 성능 열화 현상이 거의 보이지 않아서 상대적으로 넓은 신호 대 잡음비에서 사용할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

앞의 두 실험이 주는 결과를 통해서 제안한 방법이 우수한 시간 지연 추정법으로 쓰일 수 있음을 확인할 수 있다.

- [6] K. C. Ho, Y. T. Chan, P. C. Ching, "Adaptive time-delay estimation in nonstationary signal and/or noise power environments," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 41, no. 7, pp. 2289-2299, Jul. 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.*, vol. 42, no. 7, pp. 1816-1820, Jul. 1994.
- [8] S. R. Dooley and A. K. Nandi, "Adaptive subsample time delay estimation using Lagrange interpolators," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 65-57, Mar. 1999.
- [9] B. Widrow and S.D. Stearn, *Adaptive Signal Process.*, Prentice-Hall, Englewood, NJ, 1985.
- [10] S. Kawamura and M. Hatori, "A TAP selection algorithm for adaptive filters," in *Proc. ICASSP 1986*, pp. 2979-2982, Tokyo, Japan, Apr. 1986.
- [11] J. Homer, I. Mareels, R. R. Bitmead, B. Wahlberg, and A. Gustafsson, "LMS estimation via structural detection," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 46, no. 10, pp. 2651-2663, Oct. 1998.
- [12] Y. Li, Y. Gu, and K. Tang, "Parallel NLMS filters with stochastic active taps and step-sizes for sparse system identification," in *IEEE Int. Conf. ICASSP 2006*, pp. III.109-III.112, Toulouse, France, May 2006.
- [13] D. M. Etter, "Identification of sparse impulse response systems using an adaptive delay filter," in *Proc. ICASSP 1985*, pp. 1169-1172, Tampa, Florida, USA, Mar. 1985.
- [14] M. Godavarti and A. O. Hero, "Partial update LMS algorithms," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 53, no. 7, pp. 2382-2399, Jul. 2005.
- [15] S. L. Gay, "An efficient, fast converging adaptive filter for network echocancellation," in *Proc. Asilomar 1998*, pp. 394-398. Pacific Grove, California, USA, Nov. 1998.
- [16] D. L. Duttweiler, "Proportionate normalized least-mean-squares adaptation in echo cancelers," *IEEE Trans. Speech and Audio Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 508-518, Sept. 2000.
- [17] R. Baraniuk, "Compressive sensing," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 25, no. 3, pp. 21-30, Mar. 2007.
- [18] J. Lim and W. Hong, "Adaptive time delay estimation using l1 constraint," in *Proc. Conf. Acoust. Soc. Korea*, vol. 32, no. 1(s), pp. 272-275, Incheon, Korea, May 2013.
- [19] R. Tibshirani, "Regression shrinkage and selection via the LASSO," *J. Royal Statist. Soc. B*, vol. 21, pp. 279-289, 1996.
- [20] J. Benesty, "Adaptive eigenvalue decomposition algorithm for passive acoustic source localization," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 1, pp. 384-391, Jan. 2000.
- [21] H. Lee, S. Park, S. Park, "Introduction to compressive sensing," *Mag. IEIE*, vol. 38, no. 1, pp. 19-30, Jan. 2011.
- [22] E. Candès, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 489-509, Feb. 2006.
- [23] E. J. Candès and T. Tao, "Near optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies?," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 12, pp. 5406- 5425, Dec. 2006.
- [24] E.J. Candès and J. Romberg(2006), *l1 -magic: A Collection of MATLAB Routines for Solving the Convex Optimization Programs Central to Compressive Sampling Online*, Available: www.acm.caltech.edu/l1magic/
- [25] E. Candès and T. Tao, "The dantzig selector: Statistical estimation when p is much larger than n," *Ann. Statist.*, vol. 35, no. 6, pp. 2313-2351, Dec. 2007.
- [26] *The MOSEK Optimization Tools Version 2.5. User's Manual and Reference*, <http://www.mosek.com>, 2002.
- [27] *PDCO: Primal-Dual Interior Method for Convex Objectives*, <http://www.stanford.edu/group/SOL/software/pdco.html>, 2002
- [28] *SPGL1, a solver for large scale sparse reconstruction*, <http://www.cs.ubc.ca/labs/scl/spgl1/> 2008.

- [29] G. C. Carter, *Coherence and Time Delay Estimation: An Applied Tutorial for Research, Development, Test and Evaluation Engineers*, NY: IEEE press, 1993.
- [30] Y. Chen, Y. Gu, A. O. Hero III, "Sparse LMS for system identification," in *Proc. ICASSP 2009*, pp. 3125-3128, Taipei, Taiwan, Apr. 2009.

임 준 석 (Jun-Seok Lim)



1986년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사 졸업
 1988년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사 졸업
 1996년 8월 : 서울대학교 전자공학과 박사 졸업
 1996년 7월~1997년 10월 : LG 종합기술원

1998년 3월~현재 : 세종대학교 전자공학과 교수
 <관심분야> 신호처리

편 용 국 (Yong-Guk Pyeon)



1993년 2월 : 강원대학교 전자공학과 학사 졸업
 1996년 2월 : 관동대학교 전자공학과 석사 졸업
 2004년 2월 : 세종대학교 전자공학과 박사 졸업
 2004년 9월~현재 : 강원도립대학 정보통신과 조교수

<관심 분야> 신호 처리

최 석 임 (Seok-Im Choi)



1997년 2월 : 부경대학교 전자공학과 학사 졸업
 2000년 2월 : 한양대학교 전자교육과 석사 졸업
 2011년 8월 : 강원대학교 전기전자공학과 박사 수료
 2000년 3월~현재 : 한국폴리텍

대학 강릉캠퍼스 전자통신과 부교수
 <관심 분야> 신호 처리, 무선통신, 컴퓨터