

## 수중음향채널에서 Sparse 채널 추정 기법에 관한 연구

권병철 · 이의형 · 김기만\*

### A Study on the Sparse Channel Estimation Technique in Underwater Acoustic Channel

Byung-chul Gwon · Oi-hyung Lee · Ki-man Kim\*

Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

#### 요 약

천해에서 음파 전달은 매우 복잡하며, sparse한 전달 특성을 갖는다. 이러한 환경에서 수중음향통신 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 채널을 추정하기 위한 여러 방법들이 연구되었다. 본 논문에서는 기존의 sparse-aware LMS (Least Mean Square) 알고리즘들보다 빠른 수렴속도를 갖는 LMS 기반 채널 추정 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법은  $L_p$ -norm LMS 알고리즘과 soft decision 과정을 결합한 것이다. 모의실험은 실제 해상 실험을 통하여 얻은 수중 음속 데이터를 바탕으로 수행되었다. 그 결과 제안한 방법이 기존의 방법들보다 빠른 수렴속도와 향상된 성능을 보이는 것을 확인하였다.

#### ABSTRACT

Transmission characteristics of the sound propagation is very complicate and sparse in shallow water. To increase the performance of underwater acoustic communication system, lots of channel estimation technique has been proposed. In this paper, we proposed the channel estimation based on LMS(Least Mean Square) algorithm which has faster convergence speed than conventional sparse-aware LMS algorithms. The proposed method combines  $L_p$ -norm LMS with soft decision process. Simulation was performed by using the sound velocity profile which acquired in real sea trial. As a result, we confirmed that the proposed method shows the improved performance and faster convergence speed than conventional methods.

**키워드** : 수중음향통신, 다중경로 전달, 채널 임펄스 응답, Least Mean Square, Sparse 채널, soft decision, 음속 분포

**Key word** : underwater acoustic communication, multipath propagation, channel impulse response, Least Mean Square, sparse channel, soft decision, sound velocity profile

접수일자 : 2014. 01. 27 심사완료일자 : 2014. 02. 26 게재확정일자 : 2014. 03. 10

\* **Corresponding Author** Ki-man Kim (kimkim@kmou.ac.kr, Tel:+82-51-410-4918)

Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.5.1061>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

천해에서 수중음향통신 채널 환경은 수심, 수온 분포 및 염분 농도 등에 따라 신호의 전달속도가 변화하고, 특히 해수면이나 해저면의 반사로 인한 다중경로 전달 현상이 나타난다. 또한 페이딩과 도플러 효과가 시간에 따라서 매우 빠르게 변화할 뿐만 아니라 계절이나 기상 상태의 영향을 크게 받는다[1]. 이처럼 수중음향통신은 육상에서의 전파통신에 비해 더욱 많은 제약조건을 갖고 있다. 특히 천해에서 수중음향통신은 다중경로 전달 현상에 의한 지연확산으로 인해 심볼간 간섭을 발생시키며 이는 곧 수중음향통신의 성능을 저하시키는 요인이 된다[2-4].

천해에서의 채널 전달 특성은 대부분 0에 가까운 크기를 가지면서 몇 개의 큰 값을 갖는 sparse한 전달 특성을 가지고 있다[5]. 따라서 수중음향통신에서 열악한 채널 환경을 극복하고 sparse한 채널 특성을 반영한 채널 추정 방법들이 연구되어 왔다. Sparse 채널 추정을 위한 기존 방식은 크게 두 가지로 분류 할 수 있다. 첫 번째 방식은 제곱 오차를 최소화 하는 방식이며, 두 번째 방식은 채널 임펄스 응답의 몇 가지 중요한 탭만을 선택하는 것이다[6-12]. 이러한 방법들 중 구현이 쉽고 효율적인 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 기반으로 한 sparse-aware LMS 채널 추정 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존에 대표적인 sparse-aware LMS 방법으로는 ZA-LMS (Zero-Attracting LMS)와 RZA-LMS (Reweighted Zero-Attracting LMS) 알고리즘이 있다. Chen 등은  $L_p$ -norm의 sparse 패널티를 이용한 sparse LMS 알고리즘을 제안하였고[6], Taheri 등은  $L_p$ -norm LMS 알고리즘을 기반으로 하여  $L_p$ -norm의 채널 sparsity를 좀 더 효율적으로 이용하는 적응형 sparse 채널 추정 방법을 제안하였다[7]. 지난 연구에 의하면  $L_p$ -norm LMS 알고리즘, RZA-LMS, ZA-LMS 알고리즘 순으로 추정 성능이 좋은 것으로 나타나고 있다. 하지만 해양의 시변동성이 빠르게 변화하므로 채널 추정 역시 빠른 수렴속도가 요구된다.

본 논문에서는 기존의 sparse-aware LMS 알고리즘들에 비해 빠른 수렴속도를 갖는 LMS 기반 채널 추정 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법은  $L_p$ -norm LMS 알고리즘과 soft decision 과정을 결합한 것으로 그 성능

을 모의실험을 통해 고찰하였다. 모의실험은 실제 해상 실험을 통하여 얻은 수중 음속 데이터를 바탕으로 수행되었다.

## II. 채널 추정 모델

수중음향통신 시스템에서는 시간에 따라 빠르게 변화하는 채널 특성을 파악하고, 이로 인한 신호 왜곡을 보상하기 위하여 채널 추정기와 등화기를 채택하고 있다. 채널 특성을 추정하기 위하여 송수신기는 서로 약속된 신호인 파일럿 신호를 송수신하는데 수신단에서는 이 파일럿 신호와 송신된 파일럿 신호 사이의 변화를 계산하여 채널 특성을 파악한다. 특히, 채널 추정 방법들 가운데 LMS 알고리즘 기반의 방법은 간단하면서도 효율적인 방법으로 평균 자승 오차를 최소화시키도록 하는 방법이며, 시간에 따라 변화하는 값을 추적해서 수렴하는 특성을 갖는다. 그림 1에 채널 추정 모델을 나타내었다. 여기서  $x(n)$ 은 송신단에서 전송되는 신호이며,  $z(n)$ 은 수신기에 수신된 신호이다.

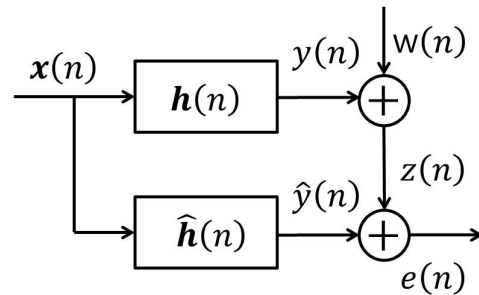


그림 1. 채널 추정 모델의 블록 다이어그램  
Fig. 1 Block diagram of channel estimation model

그림 1과 같은 모델에서 일반적인 LMS 알고리즘에 의한 채널 추정은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{h}(n+1) = \hat{h}(n) + \mu e(n)x(n) \quad (1)$$

식(1)에서  $\mu$ 는 수렴 속도를 결정하는 상수이며, 수식에서 벡터로 표현되는 변수는 굵은 글자체로 나타내었다.

### III. 제안한 Sparse 채널 추정 알고리즘

수중 채널은 다중경로에 의한 지연 확산이 발생한다. 특히 천해에서는 sparse한 임펄스 응답을 나타내는데 이는 몇 개의 탭만이 '0'이 아닌 값을 가진다는 것을 의미한다. 그림 2는 실제 동해에서 수행된 해상실험을 통하여 측정된 시간에 따른 채널 임펄스 응답의 변화를 나타내었다. 이에 의하면 상대적으로 큰 값을 갖는 경로가 4~5개가 나타나고 있으며, 나머지는 거의 0에 가까운 값을 갖는다는 것을 볼 수 있다. 이에 본 논문에서는 수중음향통신에서 sparse 채널 추정 기법의 수렴 성능을 향상시키기 위해  $L_p$ -norm LMS 알고리즘과 soft decision 과정을 결합하는 방법을 사용하였다.

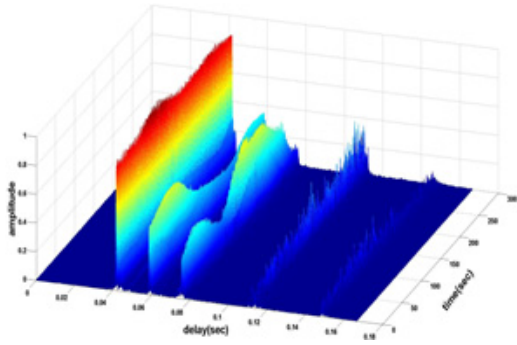


그림 2. 채널 임펄스 응답  
Fig. 2 Channel Impulse Response

$L_p$ -norm LMS 알고리즘은 아래와 같은 비용함수를 최소화하는 방향으로 구해지는데 이 때,  $\| \cdot \|_{l_p}$ 는 벡터의  $l_p$ -norm을 의미하고,  $\gamma_p$ 는 가중치에 해당한다.

$$L_p(n) = \left(\frac{1}{2}\right)e^2(n) + \gamma_p \| \hat{\mathbf{h}}(n) \|_p \quad (2)$$

위 식에서 두 번째 항은  $L_p$ -norm 페널티 항으로써 이를 이용하여 도출된 업데이트 식은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \mu e(n) \mathbf{x}(n) - \rho_p \frac{(\| \hat{\mathbf{h}}(n) \|_p)^{1-p} \text{sgn}(\hat{\mathbf{h}}(n))}{\epsilon_p + \| \hat{\mathbf{h}}(n) \|^{(1-p)}} \quad (3)$$

$\text{sgn}(\cdot)$ 은 sign 함수이며,  $x=0$ 일 때 '0',  $x>0$ 일 때 '1' 그리고  $x<0$ 일 때 '-1' 값을 가진다.  $p$ 는 0과 1 사이의 값이며,  $\epsilon_p$ 는 임의의 값으로써 분모항이 0이 되는 것을 방지한다.

본 논문에서 제안하는 방법은 식(3)의  $L_p$ -norm LMS 알고리즘에 다음과 같은 soft decision 과정을 추가한 것이다.

$$\text{SoftDecision}(a,b) = \max(|a| - b, 0) \text{sgn}(a) \quad (4)$$

따라서 제안한 방법은 아래와 같은 과정으로 정리할 수 있다.

initialize:  $\hat{\mathbf{h}}(0) = 0$  and  $\hat{\mathbf{g}}(0) = 0$ .  
for  $n = 0, 1, 2, \dots$

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \mu e(n) \mathbf{x}(n) - \rho_p \frac{(\| \hat{\mathbf{h}}(n) \|_p)^{1-p} \text{sgn}(\hat{\mathbf{h}}(n))}{\epsilon_p + \| \hat{\mathbf{h}}(n) \|^{(1-p)}}$$

$$\hat{\mathbf{g}}(n+1) = \text{SoftDecision}(\hat{\mathbf{h}}(n+1), \gamma)$$

end

제안한 방법은 1차적으로  $L_p$ -norm LMS 알고리즘을 이용하여 초기 채널을 추정된 뒤 soft decision 과정으로부터 구한  $\hat{\mathbf{g}}(n)$ 을 최종적으로 추정된 채널 정보로 사용한다. 이로써 채널 추정치들을 갱신하는 과정에서 일정 문턱치 이하의 값을 갖는 채널 추정치들을 적응 알고리즘 갱신 중간에 0으로 만든다.

### IV. 모의실험 및 결과

Sparse 채널 추정 기법의 성능을 고찰하기 위해서 동해 해상 실험을 통하여 얻은 같은 음속 분포를 모의실험에 이용하였다. 해상 실험은 그림 3과 같이 수심이 약 200 m인 해역에서 수행되었으며, XBT(eXpendable BathyThermograph)를 이용하여 획득하였다. 그림 4에 나타난 음속 분포를 보면 수심 약 40 m까지 혼합층이

존재하며, 점점 수심에 따라 음속이 감소하는 것을 볼 수 있다. 송신기는 100 m, 수신기는 해저 가까이에 배치하였으며, 송수신기간의 간격은 3,000 m로 하였다. 수신된 신호는 샘플링율이 60 kHz인 A/D 변환기를 사용하여 디지털 데이터로 변환한 후에 저장하였으며, 중심 주파수는 6 kHz, 대역폭은 4 kHz로 하였다. 수신 하이드로폰으로는 전방향 이득 특성을 갖는 Reson 4032 모델을 사용하였다.

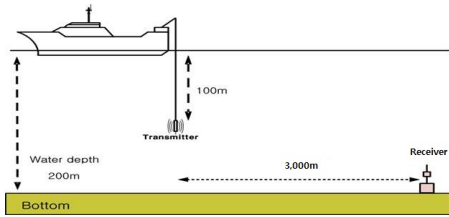


그림 3. 동해 해상 실험 환경  
Fig. 3 Experimental environment in East Sea

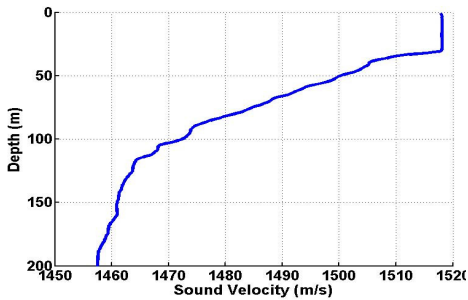


그림 4. 모의 실험을 위한 음속 구조  
Fig. 4 Sound velocity profile for simulation

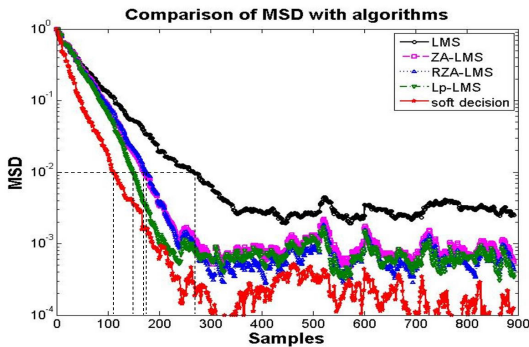


그림 5. 알고리즘에 따른 MSD 비교  
Fig. 5 Comparison of MSD according to algorithms

그림 5는 제안한 방법을 포함하여 여러 알고리즘에 따라 채널을 추정된 후 MSD(Mean Squared Deviation) 값을 로그 스케일로 나타낸 것이다. 이 때  $\mu = 0.02$ ,  $\rho_p = 2 \times 10^{-4}$  로 하였으며,  $p = 0.7$ 로 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 MSD  $10^{-2}$ 을 기준으로 하였을 때 soft decision을 적용한 방법이 기존의 방법들에 비해 빠른 수렴이 이루어진 것을 확인할 수 있다.

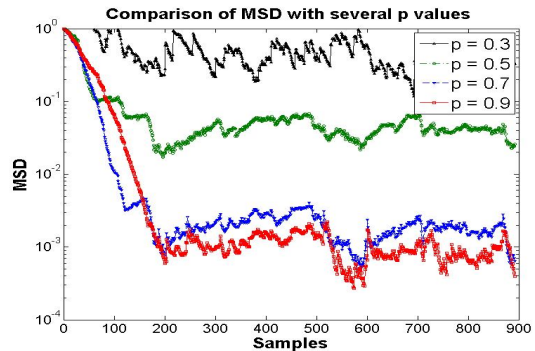


그림 6. p 값에 따른 MSD 비교  
Fig. 6 Comparison of the MSD according to several p values

그림 6은 제안한  $L_p$ -norm LMS 알고리즘과 soft decision 과정을 결합한 방법에 있어서 여러 종류의 p 값들에 따른 MSD를 나타낸 것이다. 그림은 p가 0.7 이상인 경우에 MSD가 작은 값으로 수렴하는 것으로 나타났다.

## V. 결론

본 논문에서는 천해에서 수중음향통신 채널이 sparse하다는 특징을 이용하여 기존의 sparse-aware LMS 알고리즘보다 빠른 수렴속도를 갖는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은  $L_p$ -norm LMS 알고리즘과 soft decision 과정을 결합한 것으로 그 성능을 모의실험을 통해 고찰하였다. 모의실험은 실제 해상 실험을 통하여 얻은 수중 음속 분포 데이터를 바탕으로 수행되었다. 모의실험 결과 제안한 방법은 MSD  $10^{-2}$ 을 기준으로 하였을 때 기존 LMS 알고리즘에 비해 약 14%, ZA-LMS, RZA-LMS,  $L_p$ -norm LMS 알고리즘에 비해 각 3~6%

정도 빠른 수렴을 보였으며, 작은 MSD를 나타내었다. 향후 LMS 기반 알고리즘뿐만 아니라 RLS(Recursive Least Square) 기반 알고리즘에도 soft decision 과정을 결합할 것이며, 실제 해역에서 보다 많은 데이터를 획득하여 기존 알고리즘과의 성능 분석에 대한 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD130007DD) 및 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과입니다.

### REFERENCES

- [ 1 ] R.J. Urick, *Principles of underwater sound*, McGraw-Hill, 1983.
- [ 2 ] Daniel B. Kilfoyle and Arthur B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.25, no.1, pp.4-27, Jan. 2000.
- [ 3 ] Seung-geun Kim, Sea-Moon Kim, Young-kon Lim, "Shallow Water Acoustic Communication Channel Characteristic Analysis Using PN Sequence with 25 kHz Carrier at the Shore of Geojea Island," *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, v.26, n.8, pp.381-389, 2007.
- [ 4 ] Hyung-jun Ju, Jung-woo Han, Ki-man Kim, "Analysis of Communication Signal Transfer Channel Characteristics in Shallow Water," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, v.13, n.8, pp.1534- 1542, 2009.
- [ 5 ] C. Carbonelli and U. Mitra, "A simple sparse channel estimator for underwater acoustic channels," *Oceans 2007*, pp.1-6, Vancouver, Sept. 2007.
- [ 6 ] Yilun Chen, Yuantao Gu, Hero, A.O. "Sparse LMS for System Identification", *IEEE Conference Acoustics, Speech and Signal Proceeding*, pp.3125-3128, Taipei, 2009.
- [ 7 ] Omid Taheri, Sergiy A. Vorobyov "Sparse Channel Estimation with  $\ell_p$ -norm and Reweighted  $\ell_1$ -norm Penalized Least Mean Squares", *IEEE Conference Acoustics, Speech and Signal Proceeding*, pp.2864-2867, Prague, 2011.
- [ 8 ] Zunxiong Lui, Shucheng Wang, and Tianqing Zhou, "An Adaptive  $\epsilon$ -law Sparse LMS Algorithm for System Identification", *Journal of Computational Information Systems*, vol.8, no.19, pp.7975-7982, 2012.
- [ 9 ] M. Godavarti and A. O. Hero, "Partial update LMS algorithms," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.53, pp. 2382 - 2399, 2005.
- [10] R. Baraniuk, "Compressive sensing," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no.7, pp. 118-124, July 2007.
- [11] E. Candes, "Compressive sampling," *Int. Congress of Mathematics*, vol.3, pp.1433-1452, 2006.
- [12] D. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289 - 1306, Apr. 2006.



권병철(Byung-Chul Gwon)

2013년 한국해양대학교 전파공학과 (학사)  
 2013년-현재 한국해양대학교 전파공학과 (석사과정)  
 ※관심분야 : 수중음향통신, DSP 및 CPLD



이외형(Oi-Hyung Lee)

2001년 한국해양대학교 전파공학과 (학사)  
 2003년 한국해양대학교 전파공학과 (석사)  
 2007년-현재 한국해양대학교 전파공학과 (박사과정)  
 ※관심분야 : 수중음향통신, DSP 및 CPLD



**김기만(Ki-Man Kim)**

1988년 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1990년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1995년 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
1996년-현재 한국해양대학교 전파공학과 교수  
1997년-현재 한국정보통신학회, 종신회원  
2007년-현재 방위사업청 지정 수중통신탐지특화연구센터 실장  
2013년-현재 TTA WG3181 수중음파통신 표준화 그룹 위원  
※관심분야 : 수중음향통신, 소나 신호처리, MIMO detection, 채널 추정, DSP 및 CPLD