

# 수중음향 채널추정을 위한 Blind Identification 알고리즘의 실험적 연구

최영철, 김시문, 임용곤  
한국해양연구원

## An Experimental Study of a Blind Identification Algorithm for Underwater Acoustic Channel Estimation

Youngchol Choi, Sea-Moon Kim, Yong-kon Lim

KRISO/KORDI, ycchoi@kriso.re.kr, smkim@kriso.re.kr, yklim@kriso.re.kr

### 요약

수중음향통신 관점에서 바다와 같은 수중채널은 수십 심벌에 이르는 다중경로와 빠르게 변화하는 도플러 효과가 존재한다. 따라서 신뢰성 있는 수중음향통신을 위해서는 채널 등화가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 이차 통계량 기반의 Blind Identification 알고리즘을 이용한 수중음향 채널추정 기법을 이용하여 무향수조의 채널응답을 분석하였다. 실험을 통하여 알고리즘의 추정 정확도 및 트랜스듀서 특성을 포함한 무향수조의 채널 응답 특성에 대하여 논한다.

### 1. 서론

바다 속과 같은 수중에서 전자파는 급격한 감쇠로 인하여 통신 수단으로 사용할 수 없고 수중 통신에서는 상대적으로 원거리까지 전파 가능한 음파를 이용한 무선 통신이 널리 이용되고 있다. 음파는 전자파에 비해서 상대적으로 느린 전파속도 때문에 고속 통신을 하는 수중음향 수평채널은 수직채널에 비해서 다중경로가 수십 심벌에 걸쳐서 발생한다. 또한 다중경로 및 도플러효과가 시간에 따라서 매우 빠르게 변화하며 채널이 빠른 주파수 선택적 페이딩 특성을 나타낸다[2,3].

이와 같은 수중음향 수평채널의 특성을 극복하기 위한 신호처리 알고리즘은 등화기[2]와 빔형성 기법과 같은 배열 센서를 이용한 다채널 신호처리 기법[5]으로 나눌 수 있으며 이 둘을 동시에 적용[4]할 수도 있다.

수중음향통신 채널과 같이 시간에 따라서 변화하는 채널에서는 신호 프레임 길이가 채널의 coherence time[6]보다 작도록 신호를 프레임 단위로 구성하여 매 신호 프레임마다 훈련신호열을 삽입하여 채널 특성을

추정하고 보상하는 적응 알고리즘이 널리 사용되고 있다. 하지만 훈련신호열은 데이터가 아니기 때문에 전송 수율을 감소시킨다. 특히 신호 프레임 길이가 짧으면 짧을수록 훈련신호열 길이는 전송 수율 향상에 매우 큰 장애요소가 된다. 따라서 훈련신호열없이 채널 왜곡을 보상할 수 있으면 전송 수율이 향상될 수 있는데, 이와 같은 알고리즘을 blind 알고리즘이라고 한다.

[1] 논문이 발표되기 전까지 blind identification 및 equalization 알고리즘은 3차 이상의 고차 통계량을 이용한 최적화 알고리즘이었으며 이 알고리즘들은 수렴속도가 느리고 채널 상태에 따라서 최적해가 존재할 수도 존재하지 않을 수도 있다. Blind Identification의 이러한 단점을 극복하기 위한 연구가 꾸준히 진행되다가, 1994년에 이차 통계량을 이용하여 non-minimum phase 채널인 경우에도 정확한 채널 추정이 가능한 알고리즘[1]이 발표되면서 blind 알고리즘은 실제 시스템에서의 적용 가능성을 한층 높였다.

본 논문에서는 훈련신호열을 사용하지 않는 Blind Identification 알고리즘 중에서 Tong이 제안한 이차통계량 기반의 알고리즘을 기반으로 실험을 통하여 무향수조의 채널응답을 분석한 결과에 대하여 논하도록 하겠다.

### 2. 이차통계량 기반의 Blind Identification 알고리즘[1]

#### 2.1 Blind Identification 알고리즘

이차 통계량을 이용한 시간 영역에서의 blind identification 알고리즘은 다음과 같이 요약할 수 있다.

Step 1. 표본화 간격:  $T_s$ , 과샘플율:  $\Delta$ , 심벌 간격:

$T$  시간  $t_0$ 로부터  $L = m\Delta$  시간만큼 데이터를 관측하는 경우에 관측 신호 벡터  $x(i)$ 를 다음과 같이 구성한다.

$$x(i) = \begin{bmatrix} x(t_0 + \Delta + iT) \\ \vdots \\ x(t_0 + m\Delta + iT) \end{bmatrix}, i=0, 1, \dots$$

Step 2.  $x(i)$ 로부터 자기상관행렬을 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{R}_x(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i) x^H(i)$$

$$\hat{R}_x(1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i) x^H(i-1)$$

여기에서  $(\cdot)^H$ 은 복소 대칭행렬이다.

Step 3.  $\hat{R}_x(0)$ 로부터 신호 부공간의 차수  $d$ 와 잡음 공분산  $\sigma$ 를 추정한다.

Step 4.  $R_0 = \hat{R}_x(0) - \hat{\sigma}^2 I$

의 Singular Value Decomposition (SVD)[7]을 계산하여

$$F = \Sigma^{-1} U_s^H$$

를 계산한다. 여기에서  $\Sigma$ 는  $d$ 개의 가장 큰 singular value로 이루어진  $d \times d$  대각행렬이고,  $U_s$ 는  $d$ 개의 가장 큰 singular value 값에 해당하는 singular vector에 의해서 구성되는 행렬이다.  $I$ 는 단위행렬이다.

Step 5.  $R = F (\hat{R}_x(1) - R_n(1)) F^H$

의 SVD를 계산하여, 가장 작은 singular value에 해당하는 왼쪽 singular vector  $y_d$  및 오른쪽 singular vector  $z_d$ 를 구한다. 여기에서

$$R_n(1) = \hat{\sigma}^2 J^T, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

이다.

Step 6. 채널 행렬  $H$ 의 추정치  $\hat{H}$ 를 다음과 같이 구한다.

$$\hat{H} = U_s \Sigma Q$$

여기에서  $Q$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$Q = [y_d, R y_d, \dots, R^{(d-1)} y_d]$$

또는

$$Q = [ (R^\dagger)^{(d-1)} z_d, (R^\dagger)^{(d-2)} z_d, \dots, z_d ]$$

여기에서  $(\cdot)^\dagger$ 는 pseudo inverse이다.

## 2.2 Blind Identification 알고리즘 전산모의 실험

알고리즘 분석을 위한 전산모의 실험을 위하여 Binary phase shift keying(BPSK) 신호를 이용하였고 펄스 성

형 필터는 roll-off factor가 0.25고 시간 지연이 3T인 raised cosine filter(RCF)이며 표본화 간격은 심벌 간격의 4배, 즉  $\Delta = 4$ 로 하였다. 펄스 성형 필터는 주파수 영역에서 신호의 대역폭을 제한하면서 동시에 ISI가 없도록 하는 필터로서 대역폭이 제한되어 있는 디지털 통신에서는 반드시 사용되는데, RCF가 가장 널리 사용된다. 전산 모의 실험에서 채널을 펄스 성형 필터로 가정하는 것은 다중 경로가 없는 가장 이상적인 환경이면서 가장 기본이 되는 환경이다.

그림 1은 SNR(신호 대 잡음 비, signal to noise ratio)이 20dB인 경우에 채널을 추정하여 추정된 채널 행렬의 모든 열벡터를 그린 것이다. SNR이 20dB인 환경은 잡음이 매우 작은 환경으로서 BPSK 경우에 bit error rate(BER)이  $10^{-7}$  이하이다. 알고리즘 Step 2에 해당하는 자기 공분산 행렬 추정에서  $N=100$ 으로 하였다. 그림 1에서 실선은 실제 채널이고 점선이 추정된 채널이다. 채널 행렬의 열벡터는 실제 채널의 시간 이동한 값들인데, 그림에서 같은 그림이 반복되어 있는 것을 알 수 있다. 채널 행렬 열벡터 중에서 크기가 가장 큰 것이 실제 채널 벡터가 되는데, 추정된 채널 행렬의 뒷열일수록 오차가 증가하는 경향이 있으므로 중앙에 있는 열벡터를 취하는 것이 일반적으로 가장 안정적이라고 할 수 있다.

그림 2는 그림 1과 같은 조건에서 100번 독립적으로 추정한 것이다. 결과를 살펴보면, [1]에서도 마찬가지로, 채널의 앞부분에서 편차가 뒷부분보다 큰 것을 알 수가 있는데, 이러한 현상은 SNR 값에 관계없이 모든 경우에 대해서 발생했다. 그리고 채널의 최고치를 넘는 값은 없는데, 이것은 SNR이 일정 값 이상이면 모두 같은 결과가 관찰되었다. 공분산 행렬 추정치의 정확도를 높이기 위해서  $N$ 을 증가시키면 추정 편차가 작아진다.

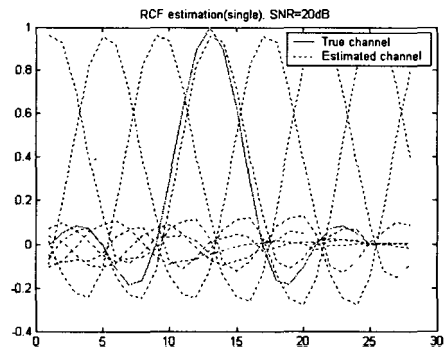


그림 1 채널 행렬 추정

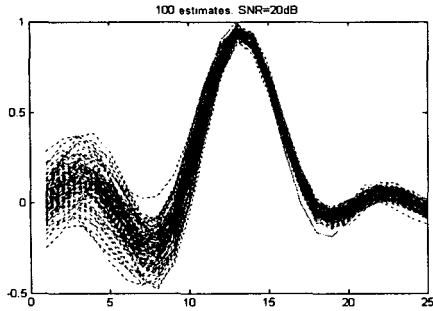


그림 2 독립적인 채널 추정 100회 시행

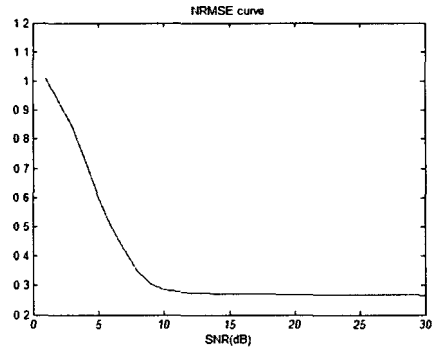


그림 3 SNR에 따른 NRMSE 곡선

그림 3은 SNR 변화에 따른 추정 오차 성능이다. SNR을 1dB부터 30dB까지 1dB씩 증가시키면서 총 100회 반복하여 평균을 취한 것이다. SNR이 1dB부터 10dB까지 증가할수록 SNR에 반비례하여 NRMSE값이 감소하지만 SNR이 10dB 이상되면 NRMSE 값이 더 이상 감소하지 않고 포화 상태에 이르는 것을 알 수 있다. 따라서 SNR이 일정 값 이상이 되면 아무리 증가해도 채널 추정 정확도는 더 이상 향상되지 않는다. 여기에서 정규화된 채널추정 오차 (normalized root mean square error (NRMSE))는 다음과 같다.

$$NRMSE = \frac{1}{\|k\|} \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \|\hat{h}_k - k\|^2}$$

$\hat{h}_k$ 는  $M$ 번 제 시도 중에서  $k$ 번째 추정된 채널이다.

### 3. 무향수조 채널 추정

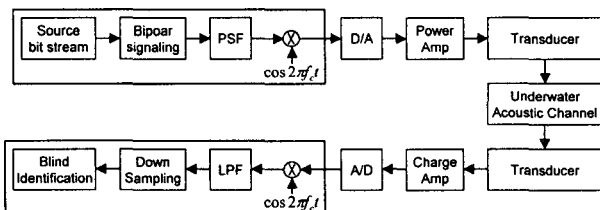


그림 4 무향수조 실험 블록도

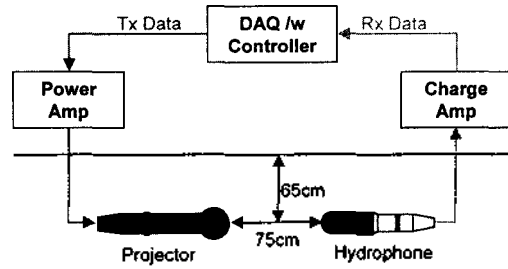


그림 5 무향수조 실험 구성도

그림 4는 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 보유하고 있는 무향수조[8] 채널 추정을 위한 실험 블록도이고, 그림 5는 실험 구성도이다. 2절의 전산모의실험 환경은 기저대역 신호만을 이용하였는데, 무향수조에서의 실험 환경은 기본적으로 이것과 동일하나 중심주파수 50KHz에 대한 디지털 변복조 과정이 있다. 실험 환경을 요약하면 다음과 같다.

- 중심 주파수: 50KHz
- 심벌율: 5000 sps
- 펄스 성형 필터: RCF /w roll-off factor 0.25
- D/A generation rate: 200KHz
- A/D sampling rate: 200KHz
- 송수신 거리/깊이: 75cm/65cm

무향수조는 표면을 제외한 모든 면에 흡음판이 설치되어 표면 반사파만 존재한다. 이 실험의 경우에 송수신 거리가 75cm이고, 송수신 센서의 깊이가 65cm이므로 표면 반사파는 직접파와 비교했을 때 상대적인 크기는 0.5이고 시간 지연은 0.5ms (음파의 전달 속도를 1500m/s로 가정)이다. 심벌 간격은 0.2ms이므로 이 때의 시간 지연은 2.5심벌에 해당한다.

우리가 blind identification 알고리즘을 이용하여 추정한 결과는 이와 같은 표면 반사파를 포함한 채널의 순간 응답과 송신 필터, 수신 필터, 송수신 트랜스듀서 특성을 모두 포함한 것이다. 즉 송신 필터, 수신 필터, 송신 트랜스듀서, 수신 트랜스듀서, 채널의 순간 응답을 각각  $h_T(t)$ ,  $h_R(t)$ ,  $g_T(t)$ ,  $g_R(t)$ ,  $h_C(t)$ 라고 하면 blind identification 알고리즘이 추정하는 채널은

$$h(t) = h_T(t) * g_T(t) * h_C(t) * g_R(t) * h_R(t)$$

이다. 여기에서 \*은 convolution을 표시한다.

그림 6은 공분산 행렬을 1000번 추정하여 평균을 취한 것에 대한 채널 행렬 추정 결과이다. 관찰 구간은  $20T$ 이고,  $\Delta = T_s/T = 4$ 이다. 우리는 송수신 트랜스듀서와 무향수조의 채널 특성을 정확히 알 수 없기 때문에 채널 추정결과에 대해서 정확도를 정량적으로 분석할 수 없다. 하지만 blind identification 알고리즘은 채널 추정이 정확할 경우에 추정된 채널 행렬의 열 벡터 성분들이 채널의 time-shifted 된 것이므로 채널 행렬의 열 벡

터들을 그렸을 때 이러한 특성이 나타나면 채널 추정이 정확한 것으로 판명할 수 있다. 즉 채널 행렬의 열벡터들이 그림 6과 같이 큰 변화 없이 반복되는 특성을 나타내면 채널 추정은 정확하다.

그림 7은 채널 행렬의 가장 가운데 열벡터를 그린 것으로서 실제 채널의 순간 응답이다. 우리는 펄스 성형 필터로 RCF를 사용하는데, 다중 경로 성분이 하나이고, 송수신 트랜스듀서의 특성을 무시할 경우에 기본적으로 채널 추정 결과가 RCF 형태이어야 함을 예측할 수 있다. 그림 7의 채널 추정 결과는 우리가 송신부에서 사용한 RCF와 형태가 유사함을 알 수 있으며 좌우의 ripple 성분들이 다중경로 성분과 송수신 트랜스듀서의 특성에 의해서 나타나는 것으로 예측할 수 있다.

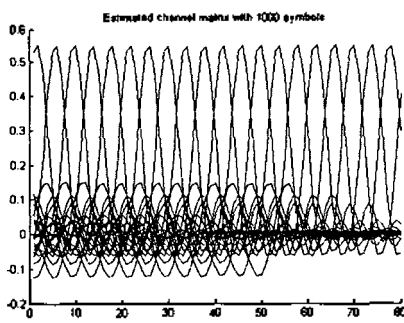


그림 6 추정된 채널 행렬 (N=1000)

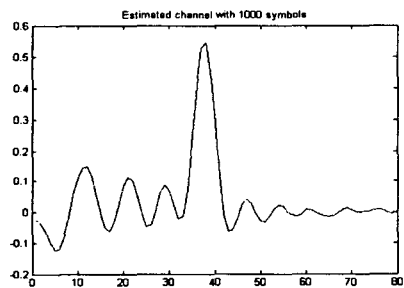


그림 7 추정된 채널의 순간 응답 (N=1000)

#### 4. 결론

우리는 본 논문을 통해서 이차 통계량 기반의 Blind Identification 알고리즘의 특성을 분석하였고, BPSK 데이터 송수신 실험을 통한 무향수조 채널을 추정하였다. 다중경로 성분이 매우 많은 실제 바다 환경에 적용하기 위해서는 알고리즘 복잡도 감소와 적은 데이터로 채널 추정이 가능하도록 향후 연구가 진행되어야 한다.

#### 후기

본 논문은 과학기술부 국가지정연구실 "수중 3차원 푸전영상 생성, 탐지 및 전송기술 개발" 과제와 해양수산부 "수중 무선통신 시스템 개발" 과제의 결과임을 밝힙니다.

#### 참고문헌

1. L. Tong, G. Xu, and T. Kailath, "Blind identification and equalization based on second-order statistics: a time domain approach", *IEEE Trans. Information Theory*, Vol. 40, No. 2, pp. 340-349, Mar. 1994.
2. M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 19, pp. 100-111, Jan. 1994.
3. D. Kilfoyle and A. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, Vol. 25, pp. 4-27, Jan. 2000.
4. M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. G. Proakis. "Adaptive multichannel combining and equalization for underwater acoustic communications," *JASA*, Vol. 94, No. 3, pp. 1621-1631, Sept. 1993.
5. G. Henderson, A. Tweedy, G. Howe, O. Hinton, and A. Adams, "Investigation of adaptive beamformer performance and experimental verification of applications in high data rate digital underwater communications," *Proc. OCEANS'96*, 1996.
6. J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1983.
7. G. Golub and C. Van Loan, *Matrix Computations*, The Johns Hopkins University Press, 1996.
8. S. Kim, C. Lee, Y. Choi, J. Park, and Y. Kim, "An experimental model of surface reflection in the underwater anechoic basin at KRISO," *Proc. UT 2002*, 2002, pp. 257-260.