

동해 연근해에서 수중통신 채널의 지배응답 검출을 통한 시간 상관도의 산출

Extraction of Time Coherence Using Detection of Dominant Components for Underwater Acoustic Communication Channels at East Sea

김현수, 김재영, 박건우, 김성일*, 정재학†

(Hyeonsu Kim, Jaeyoung Kim, Gunwoo Park, Seongil Kim*, and Jaehak Chung†)

인하대학교 전자공학과, *국방과학연구소 6본부

(접수일자: 2012년 8월 31일; 수정일자: 2012년 11월 5일; 채택일자: 2012년 12월 3일)

초 록: 본 논문에서는 전송된 수중통신신호로부터 MMSE(Minimum Mean Squared Error) 기법으로 채널 응답을 추정하고, CFAR(Constant False Alarm Rate) 기법을 이용하여 응답성분의 전력을 기준으로 채널의 지배적인 응답을 자동적으로 구하는 방법을 제안한다. 그리고 표류상태의 송수신단을 이용한 해상실험 데이터로부터 얻은 지배적인 응답에서 응답세기 분포와 위상 변화 그리고 시간 상관도를 산출하여 통계적 특성을 분석한다. 제안된 방법을 이용하여 구해진 통계적 특성을 실제 측정 데이터에 적용했을 때 모든 데이터 구간에서의 채널을 추정하지 않더라도 모든 데이터 구간에서의 채널을 추정하는 경우보다 비트 오류율이 약 1.2배로 차이가 크지 않음을 보였다.

핵심용어: 수중음향채널, 시간 상관도, 최소평균자승 오차 추정, 상수 오경보율 검출, 위상 변화

ABSTRACT: In this paper, we propose a method that estimates the channel response from underwater communication signals with MMSE (Minimum Mean Squared Error) and detects dominant components automatically based on power of response components using CFAR (Constant False Alarm Rate). Statistical characteristics are analyzed with variation of magnitude and phase and time coherence via experimental data obtained by drifting transmitter and receiver. We show that bit error rate has small difference, 1.2 times, compared with the case using every channel information estimated within data period when estimation and equalization is performed with extracted characteristic obtained by the proposed method.

Key words: Underwater acoustic channel, Temporal coherence, MMSE estimation, CFAR detection, Phase fluctuation

PACS number: 43.30. Re

1. 서 론

수중통신 시스템의 관점에서 수중음향채널의 대표적인 특성은 다중경로 전파와 시변 특성이다.^[1] 특히 시간에 따라 채널 응답이 변하게 하는 시변 특성은 수신단에서 고정된 계수로 채널을 보상할 수 없게 하는 특성이므로 수중통신 시스템의 구현을 위해 분석될 필요가 있다. 이러한 시변 특성에 대응할 수

있는 대표적인 방법으로는 주기적으로 훈련신호를 삽입하여 채널을 추정하는 방법과 적응적으로 채널 변화를 추정하는 방법이 있다. 첫째로 훈련신호를 삽입하는 방법은 채널이 크게 변하지 않는 시간을 간격으로 하여 삽입된 훈련신호를 이용해서 채널을 추정하고 보간하여 사용하는 방법이다. 이 방법은 주기적으로 정확하게 채널 정보를 갱신할 수 있다는 장점이 있으나 훈련신호의 삽입 주기를 너무 크게 하면 주기 내의 채널 정보에 대한 정확도가 떨어지고 주기를 너무 작게 하면 데이터 전송률을 떨어뜨

†Corresponding author: Jaehak Chung(jchung@inha.ac.kr)
Department of Electronic, Inha University, 253. Yonghyundong, Nam-gu, Incheon, 402-751, Republic of Korea
(Tel: 82-32-860-7421, Fax: 82-32-868-3654)

리는 단점이 있다. 그러므로 훈련신호의 삽입 주기를 채널의 시간 변화량에 따라 정확하게 설정해야 한다. 둘째로 적응적 추정방법은 복조 결과를 참조로 하여 훈련신호의 주기적인 삽입 없이 적응적으로 채널정보를 추적하기 때문에 데이터 전송률을 떨어뜨리지 않는 장점이 있다. 그러나 적응적 추정 방법은 알고리즘에 따라 특징은 다르지만 채널의 시간 변화량에 비해 수렴속도가 너무 빠를 경우 잡음에 의한 오류가 커지거나 해에 정확히 수렴하지 못하게 되고, 수렴속도가 너무 느릴 경우 채널의 변화를 정확히 추적할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 채널의 시간 변동성은 수중음향 통신시스템의 설계에 있어서 중요한 요소라 할 수 있다.^[2-3]

이러한 수중음향채널의 시간 변동성에 대한 연구가 해상 실측값을 바탕으로 이루어졌다.^[4] 시간 변동성에 관한 연구는 시간 차이에 따라 채널이 얼마나 상관도를 갖는 지에 대해 수행되었으며 LFM(Linear Frequency Modulated) 신호와 M 시퀀스 신호 등과 같은 탐침신호를 반복하여 전송한 후 수신단에서 정합 필터링을 이용하여 채널 응답을 구하고 이로부터 시간 상관도를 산출하였다. 그러나 이러한 신호처리는 통과대역에서 근사화된 채널 임펄스 응답을 이용하여 시간 상관도를 구한 것이므로 통신 신호 상에 나타나는 위상 변동이나 페이딩과 같은 변화를 알아보기 어렵다.

이러한 점을 보완하여 기저대역 등가채널에 대한 시간 상관도 산출 연구가 이루어졌다.^[5] Yang^[5]은 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 변조 신호를 통해 추정된 채널에서 지배적인 경로에 대해 시간 상관도와 세기 분포 및 위상 변동 특성을 산출하였고, 십 수 초 동안의 연속적인 채널 변화에 대한 결과를 얻었다. 그러나 AUVFest07의 실험^[6]은 해저에 고정된 음원과 하이드로폰을 이용하였기 때문에 실제로 수중통신시스템이 적용될 플랫폼으로 고려 가능한 수상함, 함정, 무인 잠수정 간의 통신에는 적합하다고 할 수 없고, 채널응답의 지배적인 성분의 검출 과정에서 객관적인 지표 없이 임의로 응답 세기가 큰 성분을 선택하였기 때문에 자동적인 지배 응답으로 검출이 어렵다.

따라서 본 논문에서는 자동적으로 지배응답을 검

출하기 위해 MMSE(Minimum Mean Squared Error) 기법으로 채널을 추정한 후 채널응답의 평균전력에 CFAR(Constant False Alarm Rate) 기법을 적용함으로써 객관적인 지표에 근거하여 지배적인 응답을 검출한다. 그리고 검출된 지배응답으로부터 응답세기 분포, 위상 변화, 시간 상관도와 같은 통계적 특성을 산출하여 지배응답에 의한 채널의 시간 변동성을 분석한다. 특성 산출을 위해 사용된 실험 데이터는 다양한 실제 수중 플랫폼 환경에서 고려 가능한 결과를 얻기 위해 표류상태의 플랫폼을 이용하였다. 실측 데이터를 이용해서 통계적 특성에 근거하여 훈련신호의 간격을 적용한 결과 훈련신호의 비율은 줄이면서 채널 보상은 효과적으로 할 수 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 해상실험 환경에 대해 설명하고, 3장에서 채널 및 지배적 응답 추정 방법에 대해 설명한다. 그리고 4장에서 추정된 채널의 지배적 응답으로부터 얻어지는 변동성에 대해 설명하고, 5장에서 구해진 시간 상관도를 활용한 방법과 결과를 설명하며 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. 해상실험 환경

해상실험은 2010년 10월 22일 북위 37도 37.58분, 동경 129도 17.94분의 동해시 인근 해역에서 수행하였다. 평균수심이 약 300미터인 해역에서 음원 수심은 60 m, 하이드로폰 107.5 m로 배치하였다. 음원과 하이드로폰은 각각 실험선과 부표에 연결되어 표류 상태를 유지하였고, 세부실험 1은 송수신단 평균 수평거리 500 m, 세부실험 2는 4 km 지점에서 실시하였다. 표류에 의한 평균 상대속도는 세부실험 1과 2가 각각 0.24 m/s, 0.04 m/s였다.

Fig. 1은 실험의 사용된 전송 신호의 구조이다. 전송하는 신호는 반송파 주파수 6 kHz에 대역폭 4 kHz의 BPSK 변조신호를 사용하였고, 기저대역 펄스는 roll-off 인자 0.25의 Root raised-cosine 펄스를 적용하였으므로 심볼 주기는 0.3125 ms이다. 1632개의 BPSK 데이터 심볼 앞에 동기화를 위해 16개의 QPSK 심볼로 이루어진 CAZAC(Constant Amplitude Zero Autocorrelation) 시퀀스 $\exp\{j\pi/4[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ j \ -1 \ -j \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -j \ -1 \ j]\}$ 를 프리앰블로 추가하여

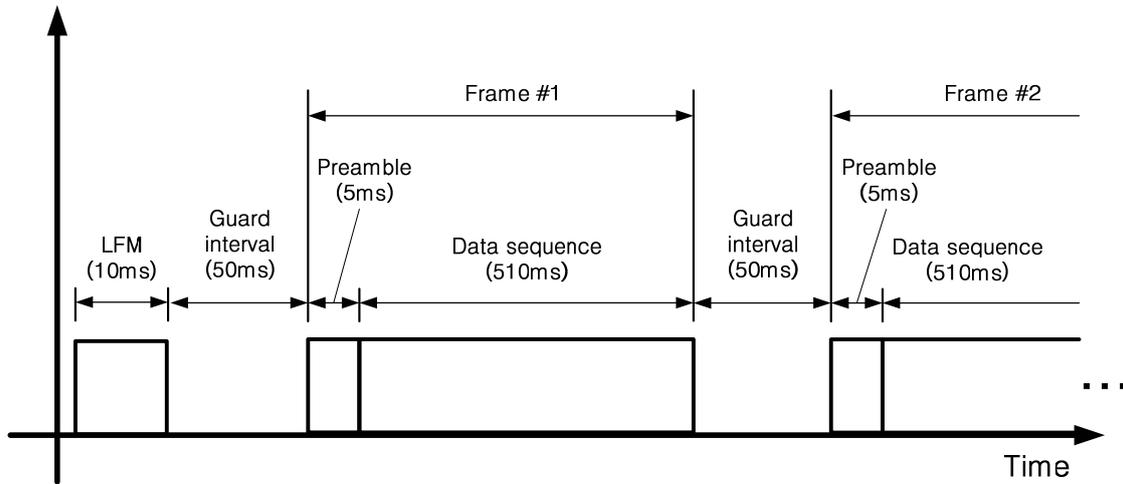


Fig. 1. Structure of transmitted signal.

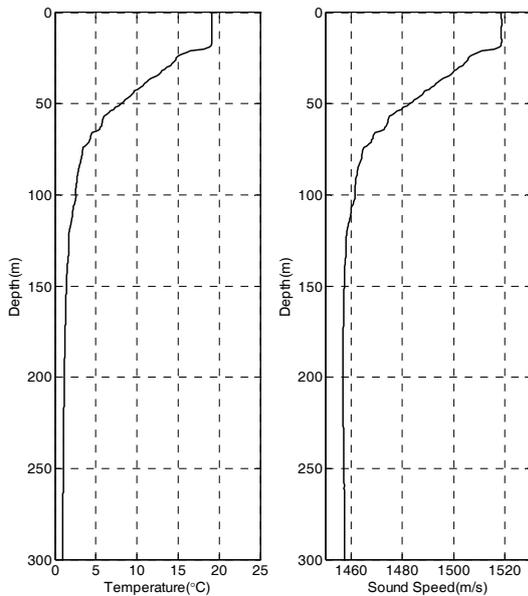


Fig. 2. Temperature and sound velocity profile at experiment site.

하나의 프레임을 구성하였고, 각 세부실험마다 49개의 프레임을 전송하였다. 그리고 프레임 전송 이전에 채널 응답의 최대 지연 길이 정보를 구하기 위해 4~8 kHz 대역의 LFM 신호를 전송하였다.

Fig. 2는 송신단에서 측정한 음속 구조이다. 수심 약 120 m까지 수온약층이 형성되며 그 이상의 수심에서는 거의 일정한 음속을 갖는 형태이다.

III. 수중채널 추정 기법

3.1 기저대역 등가채널의 추정

천해 환경에서 수중음향채널은 전형적인 sparse 채널로서 최대 지연 구간 내에 다중경로에 의한 지배적인 응답 성분이 부분적으로 존재하는 형태를 갖는다.^[6] 이러한 sparse 채널에 대한 대표적인 추정기법으로는 MP(Matching Pursuit)과 OMP(Orthogonal Matching Pursuit) 등의 방법이 있으며 부분 해로서 지배적인 응답성분을 검출하기 때문에 수중채널의 등화를 위한 채널 추정에 효율적인 기법으로 알려져 있다.^[7-8] 그러나 sparse 채널 추정 기법은 응답세가 약한 지배적인 응답 성분을 검출하지 못할 가능성이 있으며 본 논문의 관심사는 채널 등화가 아니고 채널 응답의 시간 변동성에 있기 때문에 sparse 채널 추정 기법 대신에 전역 해를 구하는 MMSE 추정 기법을 적용한다.^[9] MMSE 채널 추정을 위한 기저대역 시스템 모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{r}_i = \mathbb{S}_i \mathbf{h}_i + \mathbf{n}_i, \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} r_i \\ r_{i+1} \\ \vdots \\ r_{i+N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_i & \cdots & s_{i-M+1} \\ s_{i+1} & \cdots & s_{i-M+2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{i+N-1} & \cdots & s_{i-M+N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0^{(i)} \\ h_1^{(i)} \\ \vdots \\ h_M^{(i)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_i \\ n_{i+1} \\ \vdots \\ n_{i+N-1} \end{bmatrix}.$$

여기서 r_i, S_i, h_i 그리고 n_i 는 각각 i 번째 시점에서 수신된 신호, 훈련신호의 길쌈행렬, 채널 벡터 그리고 잡음벡터를 나타내며 M 과 N 은 각각 채널 벡터의 최대 길이와 수신벡터의 길이를 나타낸다.

MMSE 기법은 잡음전력을 고려하여 수신신호의 공분산 행렬로부터 해를 구하기 때문에 채널 추정 오류로서 나타나는 잡음의 기여도를 최소화시킬 수 있는 장점이 있으며 i 번째 시점에서 추정되는 채널 벡터를 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{h}_i = [S_i^H S_i + \sigma_z^2 \mathbb{I}_M]^{-1} S_i^H r_i \quad (2)$$

여기서 $(\cdot)^H$ 는 공액복소 전치행렬이고, \mathbb{I} 는 단위 행렬이다. 그리고 σ_z^2 은 잡음의 분산값을 나타낸다.

Fig 3의 (a)와 (b)는 각각 세부실험 1과 2의 첫 번째 프레임의 채널을 MMSE 기법으로 추정한 결과이다. 추정된 채널응답은 각 추정시점에서 전력을 기준으로 정규화하였다. 그림에서 가장 큰 세기로 나타나는 첫 번째 경로 응답 이후에 10~14 ms 지연되어 두 번째 도달하는 응답 성분들을 확인할 수 있다. 그리고 Fig 3(a)의 두 번째 지배 응답은 시간에 따라 지연 시간이 달라지는 형태를 나타내는데 이것 또한 채널의 시변동성에 의한 것으로 분석할 수 있다. 이러한 시변 지연 시간이 발생하는 지배 응답을 검출하는

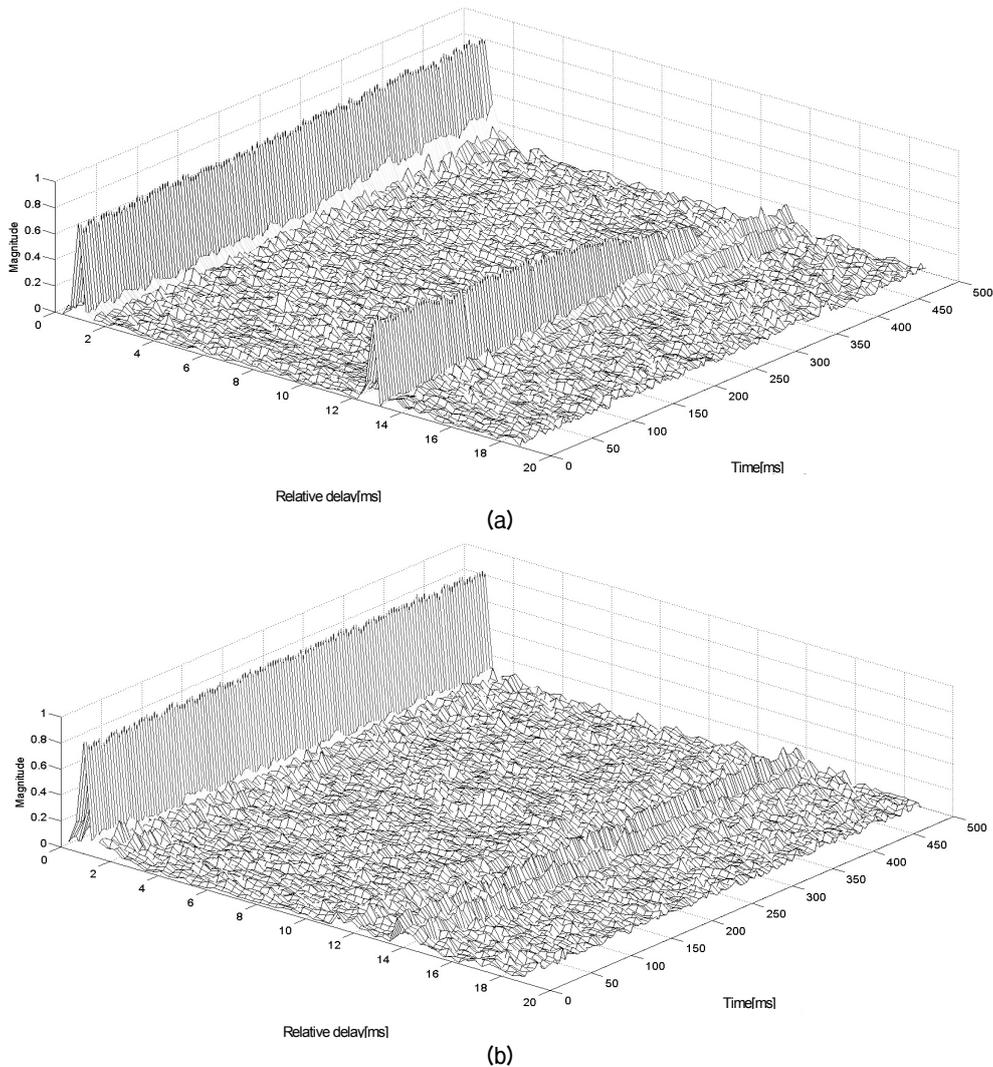


Fig. 3. Channel response estimated from a first received frame (a) 500 m case (b) 4 km case.

방법을 다음 절에서 설명한다.

3.2 수중채널의 지배적 응답 검출

본 논문에서는 이러한 추정 채널로부터 각 지연시간 별 평균 전력을 구하고 CFAR 기법을 적용하여 시간에 따라 지연시간이 변하는 지배적인 응답을 검출한다. 검출을 위해 사용되는 평균 전력은 추정된 채널에 포함된 잡음의 통계적 안정성을 얻기 위해 구하고자하는 시점을 t_0 라고 할 때 $t_0 - \Delta t$ 에서 $t_0 + \Delta t$ 까지의 채널 전력을 평균하여 사용한다. Δt 는 채널이 크게 변하지 않는 시간으로 정하며 너무 작은 값으로 설정할 경우 평균값으로서 신뢰하기 어렵고, 너무 큰 값으로 설정할 경우 지배적인 응답의 지연시간 변화를 검출하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 Fig. 3의 채널 변화 정도를 근거로 하여 임의의 값인 6.5ms로 정하였다. CFAR 알고리즘은 신호전력과 잡음전력에 대한 가설을 정의하고 고정된 오경보율을 정하여 신호를 검출하는 방법이다.^[10] 해양환경에서 실측된 통신신호는 항상 잡음에 의한 영향을 포함하고 있으며 신호로부터 추정되는 기저대역 등가 채널 응답은 복소수로 이루어진다. 따라서 CFAR 방법은 잡음에 의한 오류 허용도를 감소할 수 있는 수준의 오경보율로 고정시키고 2차 통계특성을 이용하기 때문에 응답성분의 검출에 용이하다. 잡음이 가우시안 분포를 갖는다고 가정하면 잡음전력의 확률밀도 함수는 지수 분포를 갖게 된다. 그리고 오경보율은

임계값 T 를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$P_{FA} = \int_T^{\infty} \frac{1}{\mu} e^{-x/\mu} dx. \quad (3)$$

여기서 x 는 지수분포를 갖는 잡음 전력에 대한 확률 변수이고, μ 는 평균 잡음 전력이다.

CFAR에 의해 검출된 응답성분들은 하나의 응답 그룹으로 간주할 수 있는 인접한 응답들의 형태로 나타날 수 있다. 따라서 인접 응답이 동시에 지배 응답으로 검출이 된 경우에는 최대 전력을 갖는 응답을 대표 응답으로 정하고, 탭 L 범위에서 인접 응답들을 대표하는 값으로 검출한다.^[5] 여기서 탭 간격은 심볼 간격을 의미한다. 임계값 이상의 값을 갖는 응답의 인덱스 n 을 변수로 하여 응답전력을 $p(n)$ 이라 할 때 대표응답의 인덱스 d 를 찾는 기준을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$d = \max_n p(L), \quad L = \{n-L, \dots, n, \dots, n+L\}, \quad (4)$$

Fig. 4는 첫 번째 프레임 구간에서 검출된 지배 응답을 점선으로 나타낸 그림이다. P_{FA} 와 L 는 각각 임의의 값인 10^{-4} 과 3으로 설정하였다. (a)와 (b)의 경우에서 각각 두 개씩의 지배 응답을 검출하였으며 500m에서 두 번째 지배 응답은 지연시간의 변화가 있으나 제안된 방법에 의해 변화된 지연시간까지 검출되었

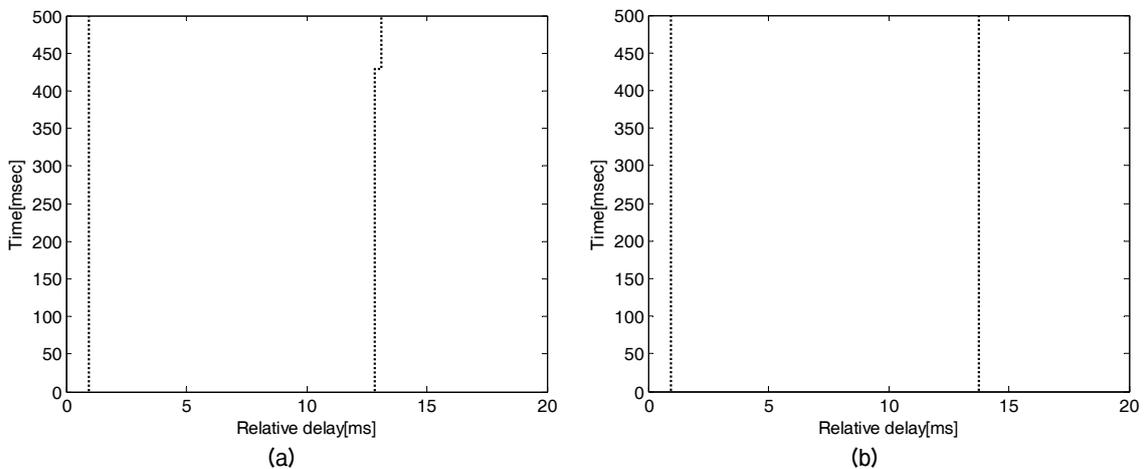


Fig. 4. Delay time of dominant components detected in a first received frame (a) 500 m case (b) 4 km case.

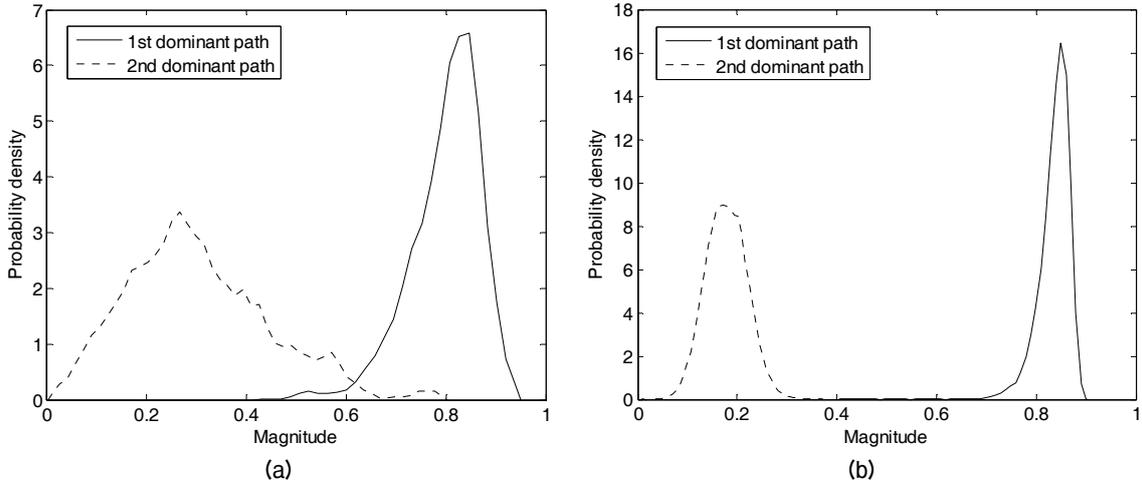


Fig. 6. Probability densities of magnitude of dominant responses (a) 500 m case (b) 4 km case.

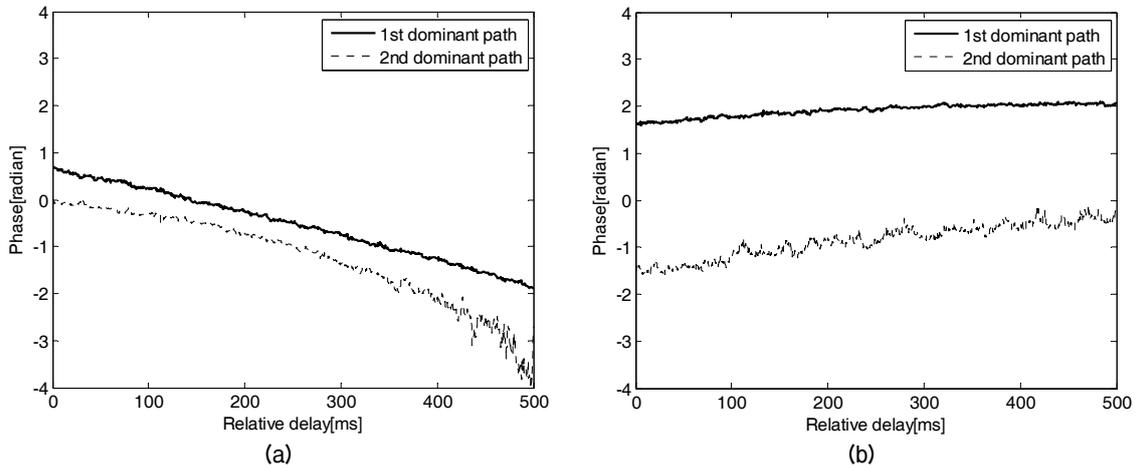


Fig. 7. Phase in a first received frame (a) 500 m case (b) 4 km case.

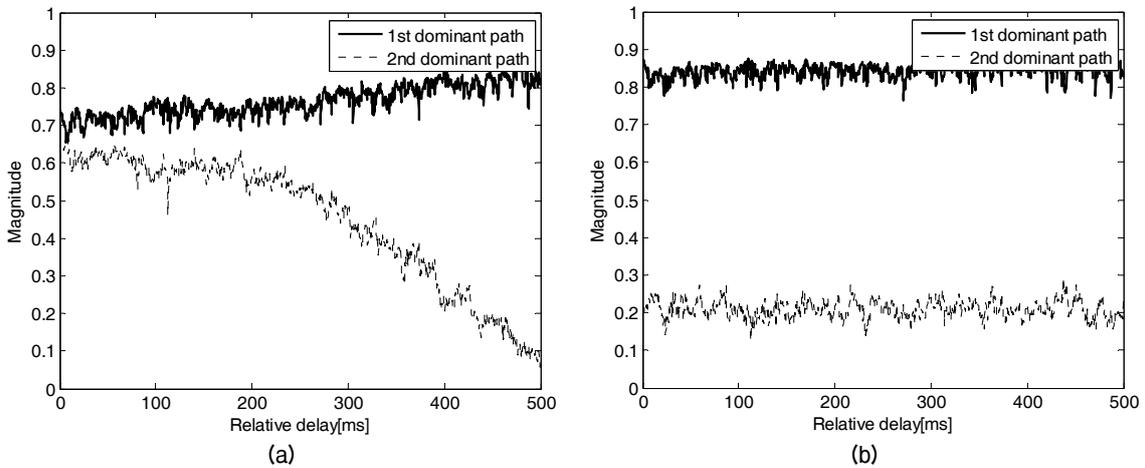


Fig. 5. Magnitude in a first received frame (a) 500 m case (b) 4 km case.

음을 확인할 수 있다.

IV. 수중채널의 변동성

앞서 언급한 바와 같이 채널의 변동성은 실제 수중통신 시스템의 구현에 있어서 필요한 정보이다. 시간에 따라 채널이 어느 정도 변하는 지를 정량적으로 알고 있을 경우 프레임의 길이와 혼련 시퀀스의 비중을 효율적으로 조절할 수 있고, 적응 등화 신호처리를 적용할 때에도 수렴속도를 최적화시킬 수 있다. 따라서 본 절에서는 앞 절에서 구한 수중채널의 지배적인 응답으로부터 얻어지는 응답세기 분포, 위상 변화량, 시간 상관도에 대해 서술한다.

4.1 응답세기의 분포

채널의 응답세기는 직접적으로 수신된 신호의 세기에 반영되기 때문에 신호 대 잡음비의 이득 또는 손실의 크기로서 영향을 분석할 수 있다. 특히 PAM (Pulse Amplitude Modulation)이나 OOK(On Off Keying)과 같이 신호의 진폭을 기준으로 하는 변복조 방식은 응답세기에 따라 성능이 크게 달라지므로 응답세기의 통계적 특성을 알아볼 필요가 있다.

Fig. 5는 첫 번째 수신된 프레임 내 지배응답의 세기이다. 500m의 경우에는 수 ms 범위에서 보았을 때 세기에 빠르고 작은 변동은 있으나 수십 ms 범위에서 보았을 때에는 느리고 작은 변화는 있지만 급격한 세기의 변화는 없는 것을 알 수 있고, 4km의 경우에는 수십 ms 범위에서 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 그리고 두 경우 모두 첫 번째 지배응답의 세기가 두 번째 지배응답의 세기보다 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 49개의 프레임을 전송하는 동안 발생한 지배 응답 세기의 빈도를 근거로 하여 확률 밀도를 나타낸 것이다. 500m의 경우 첫 번째 지배응답의 세기가 주로 두 번째 지배응답의 세기보다 크게 나타나나 낮은 확률로 두 번째 지배응답의 세기가 크게 나타날 수도 있음을 알 수 있다. 이는 근거리에서 직접파로 추정되는 첫 번째 지배응답보다 반사파로 추정되는 두 번째 지배응답이 간혹 더 강한 세기로 도달할 수 있음을 의미한다. 4km의 경우 첫 번째 지배

응답의 세기가 두 번째 지배응답의 세기보다 크게 나타나며 이는 거리가 먼 경우 반사파의 세기 감쇠가 크기 때문에 직접파의 세기가 크게 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

4.2 위상의 변화량

위상 동기식 변조방식에서는 위상 정보를 이용하여 스펙트럼 효율을 높이기 때문에 위상의 변동 특성 또한 중요한 요소이다. 특히 PSK(Phase Shift Keying)나 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)과 같이 신호의 위상을 변복조 기준으로 하는 방식은 응답성분의 위상에 따라 성능이 크게 달라지므로 위상의 변동성은 중요하다.

Fig. 7은 첫 번째 수신된 프레임 내 지배응답의 위상을 나타낸 것이다. 500m의 경우 첫 번째 지배응답은 거의 선형적으로 비율로 위상이 변화하고, 두 번째 지배응답은 프레임 후반부에서 위상의 변화가 커지며 한 프레임 구간 동안 대략적으로 π 의 위상 변화가 발생한다. PSK와 같이 위상을 이용하는 변복조 방식에서는 BPSK의 경우 위상차가 $\pi/2$ 이상일 때, QPSK의 경우 위상차가 $\pi/4$ 이상일 때 잡음의 크기와 관계없이 오류가 발생하므로 한 프레임 내에서 위상 변동이 크게 발생했다고 할 수 있다. 4km의 경우는 두 지배응답 모두 위상변화가 적게 발생하나 수 ms 범위로 관찰했을 때 두 번째 지배응답은 첫 번째 응답에 비해 작은 스케일로 변화가 심함을 알 수 있다. 전체적으로 두 경우 모두 첫 번째 지배응답보다 두 번째 지배응답의 위상 변화가 많은 것을 확인할 수 있다.

Table 1은 프레임 구간 내에서 위상 변화량의 평균을 구한 것이다. 500m와 4km 경우의 평균 위상 변화량을 비교하면 500m의 경우에 위상 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 이는 표류에 의한 송수신단 사이의

Table 1. Averaged phase variation within frame duration.

구 분		500m	4km
평균 위상 변화량 [radian]	1st dominant	2.58	1.26
	2nd dominant	3.30	1.70

상대속도가 500 m 실험의 경우 크기 때문에 발생하는 차이로 예측된다. 첫 번째와 두 번째 지배응답을 비교하면 첫 번째 지배응답이 상대적으로 더 작은 위상 변화를 갖는 것을 알 수 있는데 이는 물리적으로 직접파는 매질과 상대속도에 의한 영향만을 받는 반면 반사파는 반사체에서의 위상 변동이 영향을 끼치는 원인으로 해석할 수 있다.

4.3 시간 상관도의 산출

시간 상관도는 각 지배응답의 세기와 위상 정보를 모두 이용하여 산출되는 결과로서 통신신호 상에 나타나는 세기와 위상의 변동과 같은 채널의 영향이 시간에 따라 종합적으로 어떻게 나타나는 지를 정량적으로 나타낸다.

시간 상관도는 응답성분의 전력이 정규화된 자기상관 값이라 할 수 있으며 산출하는 식은 다음과 같다.^[4]

$$\rho(\tau) = \frac{\langle h_t^* h_{t+\tau} \rangle}{\sqrt{\langle h_t^* h_t \rangle \langle h_{t+\tau}^* h_{t+\tau} \rangle}} \quad (5)$$

여기서 τ 는 지연시간을 의미하고, $\langle \rangle$ 는 앙상블 평균을 나타내며, *는 공액 복소를 나타낸다.

Fig. 8은 전송된 모든 프레임의 앙상블 평균을 이용하여 산출한 시간 상관도이다. 500 m의 경우 두 개의 지배 응답 모두 시간에 따라 상관도가 감소하며 두 번째 응답의 상관도가 모든 구간에서 첫 번째 응

답보다 상관도가 작음을 알 수 있다. 그리고 4 km의 경우도 첫 번째 지배응답이 두 번째 지배 응답보다 시간 상관도가 높으나 첫 번째 지배응답은 일정한 비율로 상관도가 감소하는 반면에 두 번째 지배응답은 일정 비율로 감소하다가 프레임 후반부에서 첫 번째 지배응답과 비슷한 상관도를 갖는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 신호 처리에서 0.7 이상의 상관도는 높은 상관성을 갖는다고 판단하고, 0.3 이하의 상관도는 낮은 상관성을 갖는다고 판단하기 때문에 세부실험 1은 약 100 ms까지 높은 시간 상관도를 갖고, 세부실험 2는 약 120 ms까지 높은 시간 상관도를 갖는다고 할 수 있다.

V. 시간 상관도 기반 통신성능 실험

앞서 언급한 바와 같이 채널의 시간 상관도는 시간에 따라 채널이 어느 정도 변하는 지를 정량적으로 나타내기 때문에 이를 활용하여 채널 보상을 위한 신호처리에 사용할 수 있다. 본 장에서는 시간 상관도를 참조하여 해상실험에 사용된 통신신호에 대해 채널을 보상할 때 얻어지는 결과를 보인다.

Fig. 8(a)의 시간 상관도를 참조하면 두 번째 지배 응답의 경우 약 100ms까지 높은 상관성을 갖는 것으로 나타난다. 첫 번째 지배 응답은 약 150 ms까지 높은 상관성을 보이거나 전체적인 채널 응답을 고려해야 하므로 100 ms를 전체적으로 높은 상관성을 갖는 시

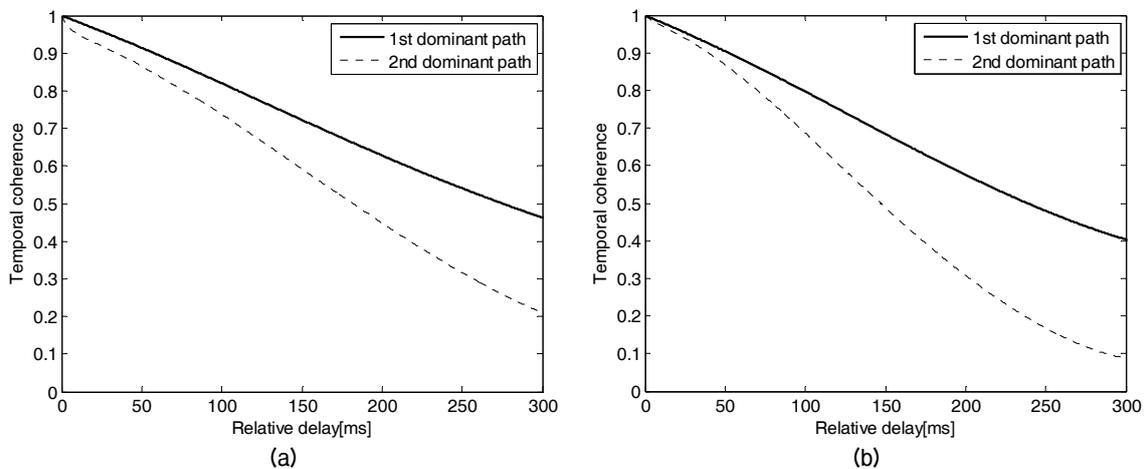


Fig. 8. Temporal coherence of dominant components (a) 500 m case (b) 4 km case.

Table 2. Bit error rate corresponding to the interval of training sequences.

구 분	비트 오류율
(a) 전체 추정 채널 사용	0.028
(b) 100ms 간격 훈련 시퀀스 사용	0.034
(c) 200ms 간격 훈련 시퀀스 사용	0.128
(d) 500ms 간격 훈련 시퀀스 사용	0.167

간으로 볼 수 있다. 이렇게 얻어진 상관 시간은 훈련 신호 기반의 채널 추정을 위한 훈련 시퀀스의 삽입 주기로서 설정한다. 훈련신호 기반의 채널 추정은 훈련 시퀀스를 이용하여 채널을 추정하고 훈련 시퀀스 주기 사이에 해당하는 채널은 추정된 채널을 보간하여 추정하는 방식으로 훈련 시퀀스의 주기를 짧게 하면 채널 추정의 성능은 높아지나 데이터 전송률이 떨어지고, 주기를 길게 하면 데이터 전송률은 높아지나 채널 추정 성능이 저하된다. 그러므로 채널 추정 성능은 유지하면서 데이터 전송률을 높일 수 있는 주기로 훈련 시퀀스를 삽입하여야 하며 이를 채널의 시간 상관도에 근거하여야 한다.

산출된 시간 상관도를 검증하기 위해 각각 다른 훈련 시퀀스 주기에 의해 추정된 채널을 이용하여 세부실험 1의 수신 신호를 등화시켰다. 측정된 신호 대 잡음비는 약 10 dB 였고, 선형 영 강제 등화기법을 사용하였으며 등화된 심볼의 수는 총 78,400개이다. Table 2는 각 훈련 시퀀스 간격별 비트 오류율을 정리한 것이다. (a)는 보간 없이 모든 데이터 시퀀스에 대해 추정된 채널을 적용한 결과이고, (b)는 100ms마다 추정된 채널을 1차 선형 보간하여 적용한 결과이다. (c)와 (d)는 각각 200ms와 500ms마다 추정된 채널을 마찬가지로 1차 선형 보간하여 적용한 결과이다. 100ms 간격 훈련 시퀀스를 사용하는 경우 모든 신호를 훈련 시퀀스로 사용하여 추정된 채널을 이용하여 등화시켰을 경우와 비교하여 약 1.2배의 작은 비트 오류율 차이만 존재한다. 그러나 간격을 200ms로 늘리면 비트 오류율이 급격히 증가하여 간격이 100ms였을 경우보다 약 4배의 비트 오류가 발생한다. 그리고 500ms의 경우는 200ms의 경우와 비교할 때 주기는 2.5배 길지만 비트 오류율은 약 1.25배의 차이만 발생한다. 따라서 시간 상관도에 근거하여 훈련 시퀀스 주기를 설정할 때 채널 추정 성능을 높게 유지할 수

있고, 그보다 주기를 길게 설정하면 추정 성능의 급격한 저하가 발생한다고 할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 동해 연근해의 수중통신 채널특성을 조사하기 위해 MMSE 추정기법을 이용하여 채널을 추정하고, 객관적인 지배응답 검출을 위해 CFAR를 적용하였다. 그리고 다양한 수중 플랫폼 환경을 고려하여 표류상태의 송수신단을 이용한 해상실험 데이터로부터 지배적인 응답을 검출하고 응답 세기, 위상 변화와 시간 상관도를 산출하였다. 산출된 시간 상관도를 근거로 하여 높은 상관도를 갖는 시간인 100ms를 훈련 시퀀스의 간격으로 설정한 결과 전체 채널을 추정해서 이용할 경우보다 약 1.2배의 비트 오류율만 갖는 것을 보였다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UD110101DD).

참고문헌

1. M. Chitre, S. Shahabodeen and M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges," *Marine Tech. Soc. J.* **42**, 103-116 (2008).
2. H. W. Kang, "Effectiveness analysis on the coherence and time for synthetic aperture sonar"(in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **25**, 172-177 (2006).
3. D. H. Choi, H. S. Kim, N. R. Kim, S. I. Kim, J. H. Chung, "Coherence bandwidth and Coherence Time for the communication frame in the underwater of east sea"(in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **29**, 365-373 (2010).
4. T. C. Yang, "Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 2595-2614 (2006).
5. T. C. Yang, "Properties of underwater acoustic communication channels in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* **131**, 129-145 (2011).
6. M. Stojanovic, "Underwater wireless communications: Current achievements and research challenges," *IEEE Oceanic Eng. Soc. Newsletter Spring* (2006).

7. M. Stojanovic, "Efficient processing of acoustic signals for high rate information transmission over sparse underwater channels," Elsevier J. Phy. Comm. **1**, 146-161 (2008).
8. H. C. Song, "Time reversal communication in a time-varying sparse channel," J. Acoust. Soc. Am. **130**, EL161-166 (2011).
9. H. S. Kim, D. H. Choi, J. P. Seo, S. I. Kim, J. H. Chung, "The experimental verification of adaptive equalizers with phase estimator in the east sea", (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **29**, 229-236 (2010).
10. M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems* (McGraw-Hill, New York, 2011).

저자 약력

▶ 김 현 수(Hyeonsu Kim)



2008년: 인하대학교 전자공학과(공학사)
 2010년: 인하대학교 전자공학과(공학석사)
 2010년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과
 박사과정
 <관심분야> 수중통신, MIMO, SDR

▶ 김 재 영(Jaeyoung Kim)



2010년: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
 2011년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과
 석사과정
 <관심분야> OFDM시스템, MIMO,
 Cognitive radio, LTE-Advanced

▶ 박 건 우(Gunwoo Park)



2012년 : 인하대학교 전자공학과 (공학사)
 2012년~현재 : 인하대학교 전자공학과
 석사과정
 <관심분야> 수중통신, MIMO, Cognitive radio,
 LTE-Advanced

▶ 김 성 일(Seongil Kim)



1986년: 서울대학교 해양학과 (이학사)
 1988년: 서울대학교 해양학과 (이학석사)
 2002 University of California, San Diego
 (이학박사)
 1990년 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원,
 한국음향학회 이사, 편집위원
 <관심분야> 수중음향학

▶ 정 재 학(Jaehak Chung)



1988년: 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1990년: 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 2000년: University of Texas at Austin
 전기전산학과(공학박사)
 2000년 ~ 2001년: University of Texas
 at Austin, post doctoral fellow
 2001년 ~ 2005년: 삼성종합기술원 수석
 연구원
 2005년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과
 부교수
 <관심분야> cognitive radio, 차세대 이
 동통신, MIMO-OFDM, UWB, cross-
 layer 설계