

수중 채널의 시변동성이 통신 스루풋 효율에 미치는 영향

Influence of Underwater Channel Time-Variability on Communication Throughput Efficiency

황찬호, 김기만,[†] 이동원,* 박태두*

(Chan-Ho Hwang, Ki-Man Kim,[†] Dong-Won Lee,* and Tae-Doo Park*)

한국해양대학교 전파공학과, *(주)한화

(접수일자: 2014년 7월 3일; 수정일자: 2014년 8월 13일; 채택일자: 2014년 9월 26일)

초 록: 수중음향 채널은 시변적인 특징을 가진다. 채널의 시변동성은 지속적인 정보 데이터 전송을 방해하여 수중음향통신의 신뢰도를 감소시키는 요인이 된다. 본 논문에서는 채널의 시변동성을 시간영역 상관도로 기술하고, 정보 데이터의 실질 전송시간을 스루풋 효율로 표현하였다. 그리고 수중음향 채널의 시변동성이 통신 스루풋 효율에 미치는 영향을 분석하였다. 실제 수중음향통신 실험을 통하여 수중채널의 시변동성이 클수록 통신의 스루풋 효율도 감소한다는 것을 확인하였다.

핵심용어: 수중음향통신, 스루풋 효율, 시변동성, 시간 영역 상관도

ABSTRACT: Underwater acoustic channel has time-variability. Time varying channel which disturbs the continuous transmission of information data reduces the underwater acoustic communication performance. In this paper, we show the temporal coherence as time-variability of channel and indicate throughput efficiency in accordance with transmission time of information data. Then we analyzed influence of underwater channel time-variability on communication throughput efficiency. We confirmed that the throughput efficiency reduced when the time-variability of the channel increased via lake trial.

Keywords: Underwater acoustic communication, Throughput efficiency, Time-variability, Temporal coherence

PACS numbers: 43.60.Dh

1. 서 론

수중음향 채널은 수중음향통신에서 극복해야 할 난제중 하나이다. 특히 수중음향 채널은 수온에 의한 음속변화로 인하여 음파의 진행방향이 일정하지 못하고, 페이딩과 도플러 확산 효과를 동반한 다중경로 특성을 가진다. 다중경로 전파로 인한 신호의 지연은 채널의 대역폭을 제한하여 데이터 전송률의 한계를 가져온다. 또한 도플러 확산 효과를 포함한 시변적인 채널의 변화는 수중음향 채널을 통과한 통신신호가 시변동성을 갖게 하여 신호의 복원을 어렵게 하는 요인이 된다. 통신 시스템에서는 시변동성

에 의한 오차를 보정하기 위하여 데이터 패킷 사이 사이에 파일럿 구간을 두지만 이러한 통신기법은 실질적인 정보 데이터 전송 시간을 의미하는 스루풋을 감소시키게 된다.

통신 패킷 내에서 파일럿과 보호 구간(guard interval)을 제외한 실질적인 정보 데이터 전송 시간은 채널의 시변동성을 포함한 환경이나 사용하는 채널 부호화를 포함한 통신 알고리즘 등에 의해 결정된다. 특히, 통신 알고리즘을 고정한다면 통신 성능 가운데 스루풋은 채널의 시변동성에 의존하게 된다. 최근 수중음향 채널의 시변동성에 대한 관심이 커지면서 그에 따른 연구가 활발하게 진행 중이다. 해외에서는 심해는 물론 천해에서 채널의 시변동성을 거리와 주파수에 따른 시간영역 상관도로 구하여 거리가 멀

[†]Corresponding author: Ki-Man Kim (kimkim@kmou.ac.kr)
Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-Ro, Yeongdo-Ku, Busan 606-791, Republic of Korea
(Tel: 82-51-410-4918, Fax: 82-51-404-3986)

수록, 사용하는 주파수가 높을수록 채널의 변동성이 크다는 사실을 밝히기도 하였다.^[1] 국내에서 천해역의 수중채널 특성을 분석하고 이 결과를 통신 시스템 설계에 적용하는 방안을 제시하였다.^[2] 또한 동해시 인근 해역에서 획득한 신호를 이용해 상관 대역폭을 산출하고, 송수신기의 움직임으로 인해 발생하는 도플러 천이 값들을 이용하여 상관시간을 구하여 통신 패킷 설계에 있어서 파일럿 사이의 간격에 따른 통신 성능을 연구하였다.^[3] 이외에도 거리와 수심에 따른 채널의 상관 대역폭과 통신 성능의 연관성이 연구되었다.^[4]

본 논문에서는 수중음향 채널의 시변동성이 통신 스루풋에 미치는 영향을 실험을 통해 고찰하도록 한다. 시변동성을 표현하기 위해 실험을 통해 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호를 이용한 채널응답 특성을 구하고, 이로부터 시간영역 상관도를 계산하였다. 이어 통신 오차율을 통해 정보 데이터 구간의 길이와 시간영역 상관도를 분석한다. 그리하여 채널의 시변동성이 통신 스루풋 성능에 미치는 영향을 분석한다.

II. 시간영역 상관도와 스루풋 효율

채널의 변동성은 통계적인 일관성의 감소 비율로 측정된 신호의 시간영역 상관도로 나타낼 수 있다. 신호의 변동성이 크다면 시간영역 상관도는 빠르게 낮아진다. 상관시간은 시간영역에서 채널특성이 변하지 않는다고 가정할 수 있는 시간을 의미한다. 신호의 시간영역 상관도는 지연시간 τ 와 신호 $s(t)$ 의 전력으로 정규화 된 상관 값으로 정의되며 아래와 같이 나타낸다.^[1]

$$\rho(\tau) = \frac{\langle s(t+\tau)s^*(t) \rangle}{\sqrt{\langle s(t)s^*(t) \rangle \langle s(t+\tau)s^*(t+\tau) \rangle}}, \quad (1)$$

$\langle \rangle$ 는 통계적인 평균이며, *는 켈레 복소수를 나타낸다. 통계적 평균은 ergodic 이론을 이용해 시간에 대한 평균으로 대체하여 구할 수 있다.

협대역 신호의 시간영역 상관도를 측정하기 위한 방법은 정합장 상관성을 이용하는 것이다. 시간 t 에

의 신호는 시간 $t+\tau$ 에 뒤따르는 신호와 상관된다.

$$\rho(t, \tau) = \frac{\sum_{j=1}^N s_j(t+\tau)s_j^*(t)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N s_j(t)s_j^*(t) \sum_{j=1}^N s_j(t+\tau)s_j^*(t+\tau)}}. \quad (2)$$

시간영역 상관도를 측정하는 또 다른 방법은 지연 시간 τ 에 의해 분리된 광대역 신호를 사용하는 것이다.

$$\rho(t, \tau) = \left\langle \frac{[s(t+\tau) \otimes s^*(t)]_{\max}}{\sqrt{[s(t) \otimes s^*(t)]_{\max} [s(t+\tau) \otimes s^*(t+\tau)]_{\max}}} \right\rangle, \quad (3)$$

$[s(t+\tau) \otimes s^*(t)]_{\max}$ 는 두 시간영역 신호 사이 상호 상관의 최대값을 의미한다. 광대역 시간영역 상관도는 여러 주파수를 이용하여 합산된 협대역 상관성과 같은 결과를 보일 수 있다. 신호의 상관시간 측정은 신호 주파수와 신호에 영향을 미치는 해양학적인 환경에 따라 큰 변동성을 가질 수 있다. 본 논문에서는 LFM 신호를 이용하여 시간에 따른 채널응답 특성을 구하고, 이와 Eq.(3)을 이용하여 시간영역 상관도를 계산하였다.

데이터 통신에서의 스루풋 효율은 일반적으로 채널의 시변동성, 통신 알고리즘 및 패킷 구조 등과 관련이 있다. 스루풋 효율은 전체 패킷 구성 가운데 실제 데이터가 차지하는 시간의 비율로 볼 수 있으며, 만약 순수한 데이터만 전송된다면 스루풋 효율은 '1'이 된다. 하지만 통상적으로 통신을 위해서는 파일럿 또는 훈련 신호 구간과 보호 구간이 요구되므로 스루풋은 '1'이 될 수 없다. 또한 채널 부호화 기법이 적용되는 경우 오버헤드가 더욱 늘어나 스루풋 효율이 저하된다. 하지만 채널 부호화 기법을 적용하지 않은 uncoded BER(Bit Error Rate)이 10% 이하이면 채널 부호화 기법 적용을 통하여 모든 오류를 정정할 수 있음이 알려져 있으므로 본 연구에서는 채널 부호화에 의한 스루풋 효율은 고려하지 않았다.^[5]

본 논문에서는 채널의 시간영역 상관도와 스루풋 효율과의 관계를 분석하기 위하여 데이터 전송률, 훈련 신호 및 보호 구간의 길이를 고정한 상태에서 정해진 통신 알고리즘으로 성능을 분석한다.

III. 실험 결과 및 고찰

수중 채널의 시변동성에 따른 스루풋 효율을 고찰하기 위하여 2014년 5월 경상북도 문경시에 위치한 경천호에서 실험을 수행하였다. 채널 임펄스 응답을 구하기 위해 길이가 20 ms, 대역폭이 6 kHz인 선형 주파수 변조된 신호에 무음구간 480 ms를 두어 0.5 s 주기로 송신하였다. 통신 신호는 반송 주파수가 16 kHz, 샘플링 주파수가 192 kHz 인 1 kbps QPSK 변조 신호를 이용하였으며, 복조 과정은 Fig. 1과 같은 방식을 이용하였다. 채널을 거쳐 수신된 신호는 대역 통과필터를 이용하여 사용 주파수 이외의 잡음신호를 걸러내고, 모호 함수(ambiguity function)를 이용해 도플러 천이 주파수를 추정한다.^[6] 추정된 도플러 천이 주파수를 이용하여 down conversion을 시행하고, roll-off factor가 0.3인 raised cosine filter를 이용하여 정합 필터링을 하였다. 위상 복구를 위해 DD-PLL (Decision-Directed Phase-Locked Loop)를 사용하였으며, 다중경로 전달로 인한 인접 심볼 간의 간섭을 줄이기 위해 정규화된 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 이용한 선형 등화기가 사용되었다.^[7] 패킷은 기본적으로 훈련 신호, 보호 구간 및 데이터 신호로 구성되었으며, 각각의 길이는 훈련신호가 0.256 s(256 심볼), 보호구간은 0.2 s, 데이터 신호는 80 s(80,000 심볼)로 하였다.

실험은 송수신기 모두 고정된 경우와 수신기만이

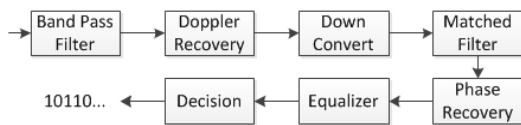


Fig. 1. Block diagram of underwater acoustic communication receiver.

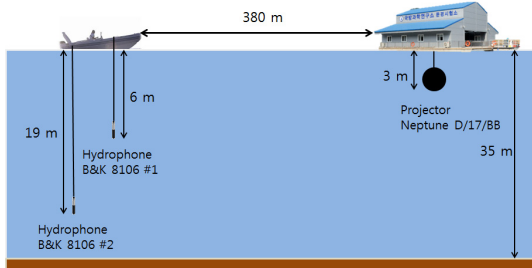


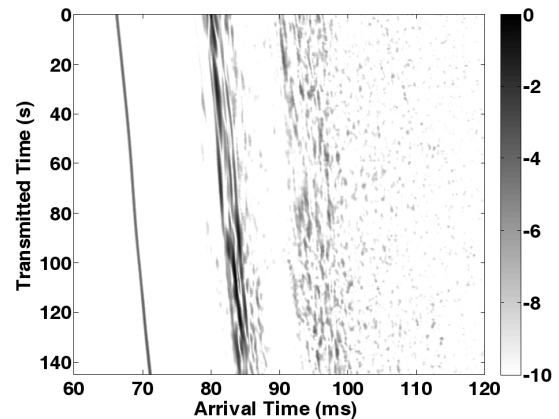
Fig. 2. Experimental setup.

동하는 경우를 고려하였으며, 송신기로는 Neptune D/17/BB, 수신기는 B&K 8106, 그리고 파워 앰프는 B&K 2713이 사용되었다. 실험 당시 수심은 약 30 ~ 40 m 였으나 거리에 따라 일정하지는 않았으며, 순간 풍속 1 ~ 8 m/s의 바람이 불규칙하게 불었다. 호수의 저질은 주로 진흙으로 구성되어 있었다.

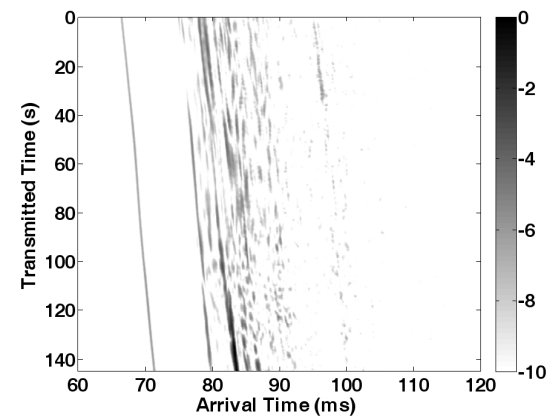
3.1 고정 실험 결과

고정 실험에서는 송신기와 수신기 사이의 거리는 약 380 m, 송신기는 수심 약 3 m, 그리고 수신기는 수심 6 m와 19 m에 2개를 각각 배치하였다.

Fig. 3은 각 수신기에서의 채널 응답특성을 나타낸다. 수신기의 수심이 6m인 경우, 직접파가 도달한 후 약 14 ms 후에 수면에 의한 다중경로 전달 특성을 볼 수 있으며, 약 24 ms 이후에도 다중경로 전달 특성이 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 수신기 배치 수심이



(a) receiver depth 6 m



(b) receiver depth 19 m

Fig. 3. Channel impulse response.

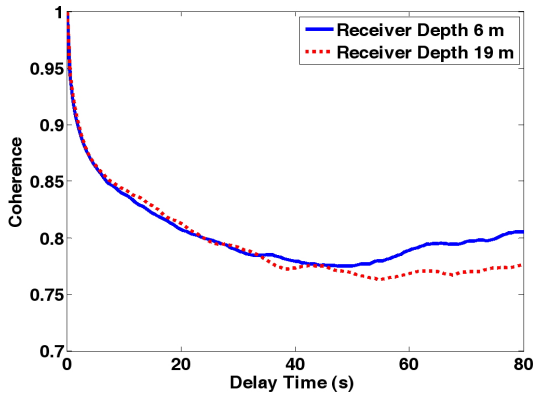


Fig. 4. Temporal coherence.

19m인 경우, 직접파가 도달한 뒤 약 8ms, 12ms 후에 시변적인 다중경로 전달 특성을 관찰할 수 있다. 두 그림 모두에서 기울기를 볼 수 있는데, 당시 수신부가 바람에 의해 뒤로 밀려나 생긴 down doppler의 영향을 나타낸다.

Figs. 4는 3에 나타난 채널응답 특성을 이용하여 계산된 시간영역 상관도이다. 초반에는 각 수신에서의 상관도 값이 거의 비슷하다가 34s 이후에 약간의 차이가 나타나는 것을 볼 수 있으나 그 차이는 크지 않으며, 두 채널 모두 시간영역상관도는 일정시간동안 약 0.75~0.8 정도를 유지하였다. 이는 시간차에 따른 채널의 상관도를 나타내는 값이며, 채널의 변화량을 상대적으로 표현한 것이다. 따라서 순간 채널의 복잡도를 표현한 것이 아니고, 채널의 상대적인 변화량을 수치적으로 나타낸 것이다. 본 논문은 시간영역 상관도가 0.85까지 도달하는 시간을 상관시간으로 하였으나 이는 채널 환경이나 문헌에 따라 차이가 있다. 상관도가 0.85인 상관시간 내에 통신패킷이 있을지라도 상관대역폭과 통신알고리즘에 의하여 통신성능은 차이를 나타내게 된다.

Fig. 5는 시간영역 상관도와 500 비트씩 세그먼트를 구분하여 각 구간 별 uncoded BER을 나타낸 것이다. 상관시간 분해능은 LFM의 주기인 0.5 s이며, 시간 분해능 사이의 값들은 보간(interpolation)값을 이용해 구해진 것이다. 앞서 설명되었듯이 uncoded BER이 10% 이하인 경우 채널 부호화 기법을 통해 데이터를 모두 복구할 수 있으므로 이 시점까지의 시간을 데이터 패킷의 최대 길이로 판단할 수 있다. 이러한 기준으로 본다면 수신기의 깊이가 6m 일 때

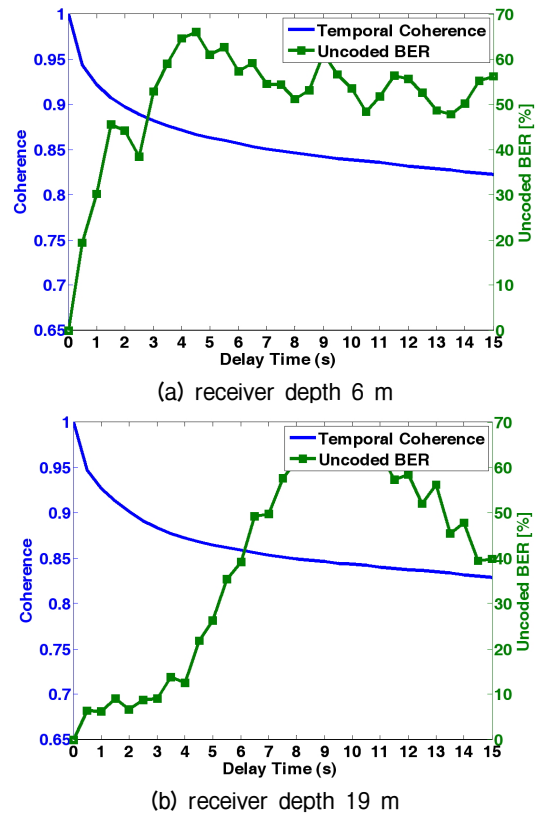


Fig. 5. Temporal coherence with uncoded BER.

시간은 0.2s, 19m 일 때는 3.2s로 확인되었다. 시간영역 상관도가 비슷한 상황에서 이러한 수신에 따른 오차율의 차이는 상관 대역폭의 차이로 볼 수 있으며 6m에서 약 156 Hz, 19m에서 약 406 Hz로 나타났다. roll-off factor 가 0.3인 1000 bps QPSK신호의 기저 대역폭이 650 Hz인 것을 고려하면 채널의 상관대역폭이 신호의 대역폭에 비해 작아 신호의 왜곡이 발생한다는 것을 알 수 있다. 이러한 상관 대역폭은 다중경로 전달에 따른 지연 확산 특성과 관련이 있다.^[3] 또한 시간이 갈수록 시간영역 상관도의 변화는 점점 줄어들고 동시에 uncoded BER이 증가하여 50%로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이것은 통신 패킷 초반부에 위치한 훈련 신호 구간에서 도플러 천이 주파수를 추정하고, 등화기의 계수들을 적절하게 찾았을지라도 데이터 구간에서 시간이 지남에 따라 발생하는 채널의 시변동성으로 인해 초기에 추정된 채널 정보 값들과는 차이가 발생하고 이를 제대로 추적하지 못함에 따라 훈련 신호 구간에서 멀어질수록 시간영역 상관도가 작아지면서 오류율이 증가하는 양상을 보

이게 된다.

3.2 이동 실험 결과

이동 실험에서는 송신기와 수신기 모두 고정 실험과 동일한 수심으로 배치하였으며, 송수신기 사이의 거리는 Fig. 6에 나타난 것처럼 약 80 ~ 120 m 사이에서 거리를 변화시키면서 진행되었다. 하지만 수신기가 이동하면서 케이블의 예인으로 인하여 실제의 수신기 수심은 원래보다 약간 뜬 상태가 유지되었다.

Fig. 7은 이동 실험구간에서의 채널 응답 특성을 나타낸 것이다. 두 그림에서 공통적으로 기울기를 확인할 수 있는데 수신기가 송신기로부터 조준선상으로 멀어지고 있으며, 수신기의 상대속도로부터 추정된 도플러 천이 주파수는 약 -10 ~ -7 Hz 이다. 수심 6 m의 수신기에서 측정된 채널은 직접파가 도달하고 약 16 ms 이후 산란파가 약하게 관측된다. 수심 19 m의 수신기에서도 산란파가 관측되나 직접파와 산란파와의 수신시간 차이가 13 ms에서 12 ms로 줄어들어 채널의 시변동이 생긴 것을 알 수 있다. 두 채널을 비교하면 6 m보다 19 m가 시간 변동성이 다소 클 것이라 예상할 수 있다.

Fig. 8은 앞서 구한 채널 응답 특성으로부터 시간영역 상관도를 구한 것이다. Fig. 4와 비교하면 이동 환경이 정지 환경에 비해 상관도 값이 작고 변화가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 수신기의 이동으로 인한 도플러 주파수와 위치 변화에 따른 채널의 빠른 변화가 크게 작용했기 때문이다. 또한 수심 6 m인 경우도

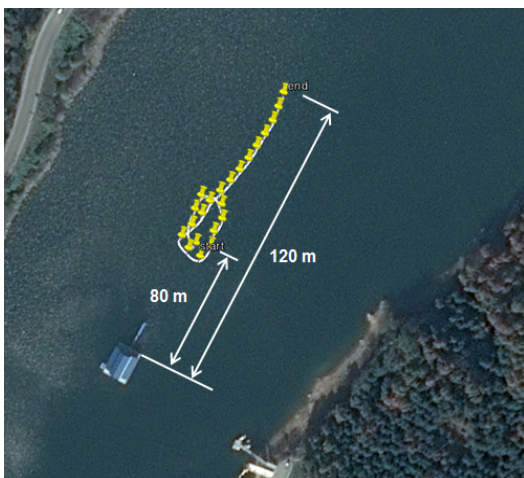
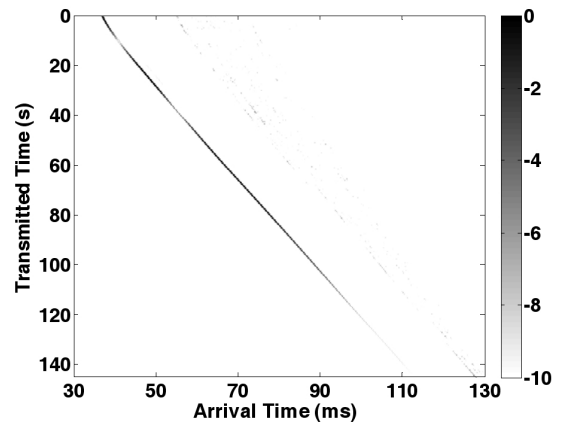


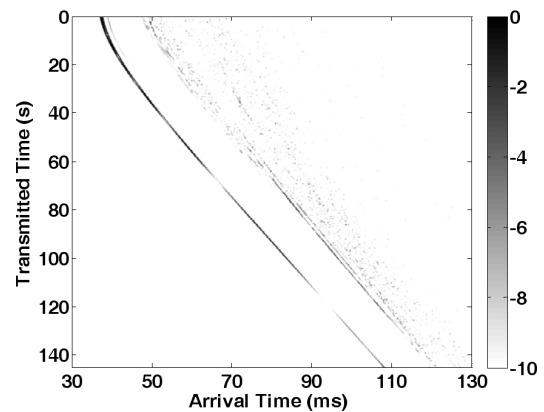
Fig. 6. Trajectory of receiver.

다 19 m에서의 상관도가 조금 더 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 수신기를 예인하는 과정에서 케이블 끝에 위치한 19 m 수신기의 움직임이 중간에 위치한 6 m 수신기보다 조금 더 컸던 것으로 보인다.

Fig. 9는 시간영역 상관도와 각 구간별 uncoded BER을 나타낸 것이다. 수신기의 깊이가 6 m 일 때, 10 %



(a) receiver depth 6 m



(b) receiver depth 19 m

Fig. 7. Channel impulse response.

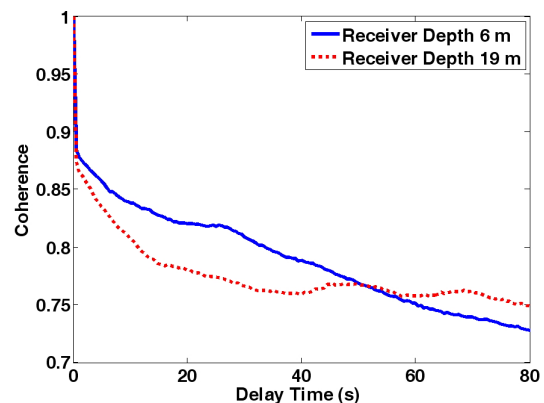


Fig. 8. Temporal coherence.

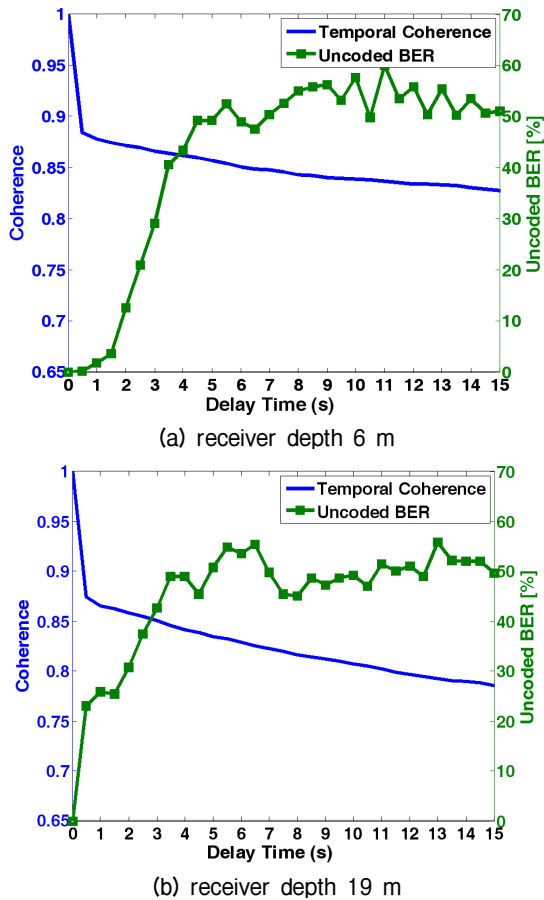


Fig. 9. Temporal coherence with uncoded BER.

오차율 이하인 시간은 1.85s였고, 19m일 때는 0.22s로 확인되었다. 채널응답 특성에서도 예상했듯이 19m 채널이 6m에 비해 지속적인 데이터 전송에는 어려움이 있다는 사실을 알 수 있다. 상관도가 0.8 이상임에도 오차율이 증가하는 것은 이동으로 인한 빠른 도플러의 변화를 데이터 복원 과정에서 따라가지 못한 것으로 볼 수 있다.

3.3 상관시간과 스루풋 효율

Table 1은 정지 및 이동 실험의 각 채널별 상관도가 0.85에 도달하는 시간인 $\tau_{0.85}$ 와 그 때의 스루풋 효율을 나타낸 것이다.

이 때 스루풋 효율은 아래와 같은 식으로 구하였다.

$$\text{throughput efficiency} = \frac{t_{10\%}}{\tau_{0.85} + t_{train} + t_{guard}}, \quad (4)$$

Table 1. Coherence time with throughput efficiency.

	receiver depth	$\tau_{0.85}$ (s)	throughput efficiency
fix	6m	7	0.0268
	19m	8	0.3784
move	6m	6	0.2865
	19m	3	0.0636

$t_{10\%}$ 는 오차율이 10% 일 때의 시간이며, t_{train} 은 훈련 신호의 시간(0.256 s)이다. t_{guard} 은 보호구간의 시간 0.2s이며, $\tau_{0.85}$ 은 시간영역 상관도가 0.85까지 도달한 시간을 뜻한다. Table 1로부터 정지 채널이 이동 채널에 비해 상관시간이 큰 것을 알 수 있는데 이것은 채널의 시변동성이 상대적으로 적다는 것을 뜻한다. 각 채널별로 상관시간이 클수록 스루풋 효율도 크다는 것을 확인 할 수 있다.

IV. 결 론

원래 스루풋 효율은 통신 시스템에 있어서 물리 계층 위의 MAC(Media Access Control) 계층에서 주로 활용되는 파라메타이나 본 논문에서는 물리 계층 관점에서 수신단이 정지 및 이동하는 수중음향통신 환경에서 시간영역 상관도를 구하고, 오류율과의 연관성을 살펴보았다. 또한 통신 패킷 길이에 따른 오류 성능을 통해 스루풋 효율을 고찰하였다. 시간영역 상관도를 0.85로 고정했을 때, 채널의 상관시간은 고정채널 6m가 7s, 19m는 8s였으며, 이동채널 6m는 6s, 19m가 3s로 고정 채널은 19m, 이동채널은 6m가 상대적으로 시변동성이 적었다. 측정된 상관시간과 통신패킷간의 관계를 스루풋 효율로 나타냈을 때, 고정실험의 스루풋 효율은 6m 채널이 0.0268, 19m 채널은 0.3784로 19m가 높았으며, 이동실험은 6m 채널이 0.2865, 19m 채널이 0.0636으로 6m가 높은 스루풋 효율을 보였다. 상관시간이 클수록 스루풋 효율도 증가하는 것을 알 수 있었다.

실제 전체 통신 시스템에 있어서 스루풋 효율은 채널의 시변동성에 의한 시간 영역 상관도뿐만 아니라 상관 대역폭, 적용되는 채널 부호화 기법, 훈련구간의 길이, 통신 알고리즘 및 물리 계층 위의 MAC 계층에서의 방법 등의 다양한 요소에 의해 결정된다.

향후 연구 내용으로는 스루풋 효율을 결정하는 다양한 요소들을 복합적으로 고려한 연구가 필요하며, 아울러 다양한 해상 실험을 통한 성능 분석에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 (주)한화의 위탁연구과제 지원으로 수행된 연구결과 중 일부입니다. 실험에 도움을 주신 국방과학연구소 관계자분들께 감사드립니다.

References

1. T. C. Yang, "Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water," J. Acoust. Soc. Am. **120**, 2595-2612 (2006).
2. S. G. Kim, S. M. Kim, and Y. K. Lim, "Shallow water acoustic communication channel characteristic analysis using PN sequence with 25 kHz carrier at the shore of Geogea Island" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **26**, 381-389 (2007).
3. D. H. Choi, H. S. Kim, N. R. Kim, S. I. Kim, and 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. K. G. Park, J. H. Park, S. W. Lee, J. W. Jung, J. C. Shin, and J. R. Yoon, "Performance evaluation of underwater acoustic communication in frequency selective shallow water" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **32**, 95-103 (2013).
5. J. T. Bae, M. H. Kim, S. S. Choi, J. W. Jung, S. Y. Chun, and K. C. Dho, "The analysis about channel code performance of underwater channel" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **27**, 286-295 (2008).
6. C. H. Hwang, H. W. Lee, K. M. Kim, D. W. Lee, and J. H. Choi, "Experimental results of an underwater acoustic communications with doppler tracking" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. Suppl.1(s) **33**, 50-51 (2014).
7. J. G. Proakis, and M. Salehi, *Digital Communications*, Fifth edition (McGraw-Hill, New York, 2008), pp. 689-695.

저자 약력

▶ 황 찬 호 (Chan-Ho Hwang)



2013년 8월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2013년 9월 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
<관심분야> 수중통신, 음향 신호처리 등

▶ 김 기 만 (Ki-Man Kim)



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학사)
1990년 8월: 연세대학교 전자공학과(공학석사)
1995년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학박사)
1995년 3월 ~ 1996년 8월: 연세대학교 의과대학 의용공학교실(Fellow)
1996년 9월 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수
<관심분야> 수중통신, 소나 신호처리, 어레이 신호처리 등

▶ 이 동 원 (Dong-Won Lee)



2004년 2월: 동명정보대학교 정보통신공학과(공학사)
2008년 2월: 국립금오공과대학교 소프트웨어공학과(공학석사)
2012년 2월: 국립금오공과대학교 소프트웨어공학과(공학박사)
2013년 ~ 현재: (주)한화 구미사업장 개발 3팀 선임연구원
<관심분야> 수중통신, 모뎀설계, 임베디드 시스템

▶ 박 태 두 (Tae-Doo Park)



2008년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2010년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)
2014년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학박사)
2014년 ~ 현재: (주)한화 구미사업장 개발 3팀 선임연구원
<관심분야> 수중통신, 임베디드시스템, 변·복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 등