
천해에서 채널의 통신신호 전달 특성 분석

주형준* · 한정우* · 김기만*

Analysis of Communication Signal Transfer Channel Characteristics in Shallow Water.

Hyng-jun Ju* · Jung-woo Han* · Ki-man Kim*

이 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

요 약

본 논문은 SSB(Single Side Band) 변조 기법을 이용하여 실제 해상에서 실험을 수행한 결과를 분석하였다. 현재 수중 통신 분야에서의 연구는 디지털 변조 기법 및 OFDM(Orthogonal Frequency Division Modulation)이나 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템을 적용하고 있으나, 실제 해상에서 사용되는 상용 통신기로는 아날로그 변조 방식을 많이 사용하고 있다. 그에 따라 본 연구에서는 한국 해양 특성에 맞는 고품질의 수중 통신기 개발을 목적으로 실험을 수행하였다. 실험은 SSB 아날로그 변조 기법으로 경상남도 진해 연안 천해의 조건에서 수행되었으며, 실제적인 채널의 영향을 해석하기 위해 도플러 효과, 잔향 특성, 전달 특성 등을 분석하였다. 결과적으로 수중 통신에 있어서 잔향과 배에서 방사되는 잡음이 가장 큰 장애 요인임을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper we achieve experimental data evaluation using SSB(Single-side band) modulation in the ocean. Present research in underwater communication is applying digital modulation, OFDM(Orthogonal Frequency Division Modulation) and MIMO(Multiple Input Multiple Output) system. However, Commercial modems using analog modulation techniques in oceans. So, we achieved experimental for modem appliance development of correct high quality in South Korea sea characteristics. This experiments achieved using SSB analog modulation in Jin-hae shore of shallow water condition. We analyzed Doppler effects, reverberation and transmission characteristics for real channel effect analysis. As a result, reverberation and ships self-noise are disturbed factors for underwater communications.

키워드

SSB, Doppler effects, reverberation, LMS

* 한국해양대학교 공과대학 전파공학과

접수일자 2009. 05. 18

심사완료일자 2009. 06. 02

I. 서 론

수중 통신은 수중에서 수집된 데이터를 전송하기 위해 그 동안 고속·장거리 전송을 목표로 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 수중에서는 매질 특성상 전파대신 음파를 사용하여야 하고 음파는 고주파 손실이 커서 대역폭이 좁고 배경 잡음의 영향을 많이 받는다. 특히 천해 환경에서는 신호의 다중 경로 전달로 인한 시간축 퍼짐(time spreading) 현상과 상대적인 이동으로 인한 도플러 퍼짐(doppler spreading) 및 낮은 신호 대 잡음비를 갖게 되어 이를 극복하기 위한 많은 신호처리 기법들이 연구되었다[1,2].

현재 수중통신 기기들은 아날로그 변조를 사용하고 있다. 이에 본 논문에서는 성능향상을 위한 실험적 단계의 모델 연구를 벗어나 실제 한국 해양에서 고품질로 통신 가능한 실제 통신기의 개발을 목적으로 아날로그 변조 기법을 이용하여 실제 해양에서 선박을 이용하여 실험을 수행하였다. 성능 개선을 위한 특별한 하드웨어나 알고리즘이 적용되지 않은 상태에서 비교적 원활한 음성 통신이 가능함을 입증하였지만[3], 좀 더 장거리의 고품질 통신을 위해서는 해양 채널의 전달 특성에 대한 분석이 필수적이다. 그에 따라 본 논문에서는 도플러 특성, 잔향 효과, 신호의 전달 특성에 대해 분석하였다.

II. 실험 환경

실험은 2007년 06월 이틀에 걸쳐서 경상남도 진해시 연안 천해의 조건에서 수행되었다. 실험에 사용된 데이터는 토널 신호와 LFM(Linear Frequency Modulation) 신

호를 사용하였다. 수중 환경을 예측하기 위해 총 8회에 걸쳐서 음속을 측정하였다. 그 결과를 그림 1에 나타내었다. 약 20m의 깊이에 대해서 해수면에서 약 1525 m/s로부터 해저면 약 1514 m/s~1510 m/s까지 비교적 선형적인 음속 프로파일 구조를 보였다.

실험은 약 0.2~1.5km 사이에서 선박을 정박한 이후 수행하였다. 송신단에서는 일반적으로 사용되는 상용 통신기를 사용하였으며, 수신단에서는 수직 센서 어레이(VLA : Vertical Sensor Array)를 사용하여 신호를 수신한 이후 복조하는 과정을 거쳤다. 센서 어레이에는 총 9개를 사용하였으나, 본 논문에서는 한 채널에 대한 분석만을 수행한다. 이러한 실험의 개념도가 그림 2에 나타나 있다. 실험 해역의 수심은 약 25m로써 굉장히 얕은 천해의 조건이다. 선박 1은 정선 상태로 고정되어 있으며, 선박 2는 1.5 nmile을 3 knots와 6 knots로 왕복 기동하였다.

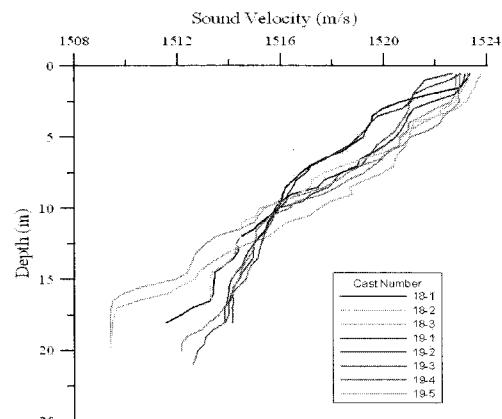


그림 1. 음속 프로파일
Fig. 1 Sound velocity profile.

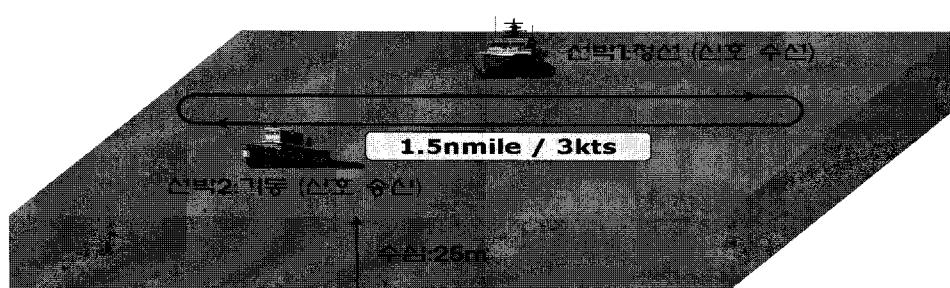


그림 2. 실험 환경
Fig. 2 Experimental Environments.

III. 도플러 효과

3.1. 도플러 천이

대부분의 수중 통신은 이동 중인 상태에서 이루어지게 된다. 따라서 송수신기 사이의 상대 속도에 따른 도플러 주파수 천이가 발생하게 되어 수중통신 시스템의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 도플러 천이 Δ 는 음파 전달속도 (c)와 소나 상대속도 (v)의 비로써 정의된다. 단일 주파수 성분 w_n 에서 도플러 효과는 다음과 같은 주파수 스케일링으로 표현될 수 있다.

$$\tilde{w}_n = w_n(1 + \Delta) \quad (1)$$

도플러 천이 문제 해결은 로컬 캐리어 주파수를 조절하는 것과 같으며, 이는 기본적으로 PLL (phase-locked loop) 등을 사용하여 이루어진다. 광대역 신호에서 도플러는 다른 양에 의해 각각의 주파수 성분을 전송하며 도플러 효과는 신호 파형의 시간 스케일링으로 모델링 된다.

$$r(t) = s((1 + \Delta)t) \quad (2)$$

여기서 $s(t)$ 는 송신신호이며, $r(t)$ 는 도플러 천이 된 수신신호이다. 이러한 도플러 효과의 광대역 모델은 수중 음향 통신에서 사용된다.

n 이 정수이고 T_s 가 샘플링 주기일 때 이산 시간영역으로 샘플링된 송신신호 $s[nT_s]$ 를 생각해보면, 수신된 신호에 발생하는 도플러 천이는 다음과 같은 샘플링 주기의 스케일링(또는 interpolation/decimation)과 같다.

$$r[nT_s] = s[n(1 + \Delta)T_s] \quad (3)$$

도플러 추정을 위해 사용되는 모호(ambiguity) 함수는 입력된 신호의 도플러 천이 변화에 대하여 정합 필터 응답을 나타낸다. 광대역 연속 시간 신호는 다음의 모호 함수로 정의된다.

$$X_s(\tau, \Delta) = (1 + \Delta) \int_{-\infty}^{\infty} s((1 + \Delta)t)s(t - \tau)dt \quad (4)$$

만일 수신된 신호 $r(t)$ 를 고려한다면, 교차 모호성 함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X_{sr}(\tau, \Delta) = (1 + \Delta) \int_{-\infty}^{\infty} s((1 + \Delta)t)r(t)dt \quad (5)$$

$r(t)$ 에서 도플러 천이를 추정하면 $\tau = 0$ 인 Δ 에서 교차 모호성 함수 $X_{sr}(0, \Delta)$ 의 최대 크기를 찾아야 한다.

$$X_{sr}(0, \Delta) = (1 + \Delta) \int_{-\infty}^{\infty} s((1 + \Delta)t)r(t)dt \quad (6)$$

일반적으로, 예측된 도플러 주파수 천이 범위 내에 있는 것만을 필요로 하는데, 이는 모호 함수의 최대치로부터 결정된다. 이는 송신신호의 다른 도플러 천이 리플리카(replica)와 함께 이산 상관기의 뱅크(bank)로써 그림 3에 나와 있다. 이 기술의 도플러 추정 해상도는 수신신호의 SNR, 신호의 시간 대역폭 (BT), 그리고 신호의 모호 함수 형태에 의해 결정된다. 최대의 해상도를 위해서는 모호 함수의 도플러 축 상에서 좁은 피크를 가지는 과정이 요구되며, 이는 PN (Pseudo Noise) 코드가 가장 적합할 것이다. 그러나 본 실험에서는 PN 코드를 이용한 실험이 없기 때문에 우선 1초 길이의 톤 신호를 이용하여 도플러 천이를 추정하였다.

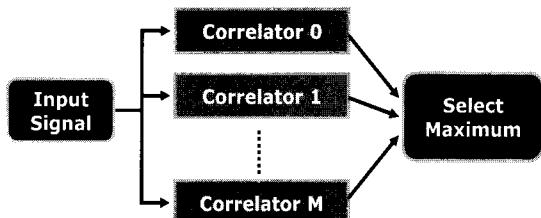


그림 3. 도플러 천이 추정 과정.
Fig. 3 Doppler shift estimation flow.

도플러 천이에 대한 방정식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta f = \pm \frac{v}{c} f \quad (7)$$

여기에서 Δf 는 도플러 주파수 천이, v 는 속도, c 는 음속을 의미한다. 이 식에 따라서 실험 당시 선박의 속도인 3knots와 6knots일 때의 도플러 천이를 이론적으로 계산하면 아래와 같다.

$v = 3\text{knots}$ 일 때 :

$$\Delta f = \pm \frac{3 \times 0.51\text{m/s}}{1500\text{m/s}} \times 9087 = \pm 9.26874[\text{Hz}] \quad (8)$$

$v = 6\text{knots}$ 일 때 :

$$\Delta f = \pm \frac{6 \times 0.51\text{m/s}}{1500\text{m/s}} \times 9087 = \pm 18.53784[\text{Hz}] \quad (9)$$

실제 선박이 기동중일 경우 선박의 속도에 따라서 도플러 주파수 천이 현상이 발생한다. 선박이 3knots와 6knots의 두 가지 속도로 기동중일 때 실험을 수행하였다. 이 때 주파수 천이 정도는 쇠 8.9와 같이 이론적으로 구할 수 있다. 선박이 기동중인 경우 송신단과 수신단 사이의 거리에 따라서 상대 속도가 달라지기 때문에 시간의 변화에 따라 도플러 천이 정도를 분석하였다. 그림 4에는 선박이 3 knots로 기동하는 경우 각각의 시간에 따라 앞서의 도플러 천이 추정 방식으로 수신신호와 각 도플러 주파수에 해당하는 리플리카 사이의 상관계수 값을 나타내었다.

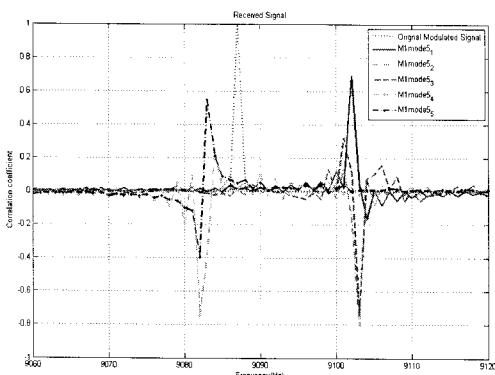


그림 4. 선박이 3 knots로 이동하는 경우의 시간에 따른 도플러 천이.

Fig. 4 Doppler shift for ship moved 3knots speed.

3knots 실험의 경우 5가지 신호 샘플에 대해서 분석을 하였다. ‘Original Modulated Signal’이라고 표시되어 있는 그래프는 송신단에서 변조된 신호의 자기 신호 사이

의 상관계수 값을 나타낸 것이다. 나머지는 다섯 가지 시간에 대한 상관계수 값을 표현하였다. 도출한 주파수 천이 값으로부터 속도를 계산해보면, 4.855 knots를 시작으로 5.1787 knots를 거쳐 1.6283 knots까지 속도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 선박이 수신단의 선박과 접촉 가까워지다가 선박과의 교차점을 지나 다시 멀어짐에 따라서 발생하는 현상이라 할 수 있다. 선박의 속도가 6 knots일 때의 속도를 계산해보면, 8.0917 knots를 시작으로 7.7680 knots로 이동하다가 교차지점 근처에서 1.2947 knots까지 속도가 떨어졌다. 비교적 먼 거리에서 3 knots일 때의 두 배에 가까운 속도를 나타내주고 있으며, 교차지점 근처에서의 상태는 3 knots의 경우와 유사하게 나타났다. 즉, 이론치와 비교하여 실제 데이터의 도플러 천이 정도는 유사하게 측정되었으며, 이는 본 논문의 실험 데이터의 높은 신뢰도를 나타내는 것이다.

3.2. 도플러 확산

랜덤한 신호의 변동(마이크로 다중경로)은 결정된 전달 경로들(매크로 다중경로)의 각각과 관련하여 정확히 모델링 될 수 있으며, 이는 채널 응답의 시변성을 평가한다. 랜덤한 변동의 일부는 통계적 수치로 모델링 될 수 있다[4,5]. 이들은 천해 채널의 시변성 모두에 매우 중요한 역할을 하며 파동에 의한 수면 스캐터링을 포함한다. 게다가 심해에서 수면 스캐터링과 내부 파동은 결정된 경로들의 각각을 따라 전달되는 신호의 시변성에 기여한다.

수면 스캐터링은 해양 표면의 거칠기(roughness)에 의해 발생한다. 만약 해양이 고요한 경우 표면에서 일어나기 쉬운 신호는 대부분 오직 π 에 의해 위상 천이되어 완벽하게 반사된다. 하지만, 파동은 반사 지점의 이동이나 에너지 분산의 결과로 수면의 수직 이동은 영분산 가우시안 랜덤 변수로써 모델링 된다. 이는 오직 풍속에 의한 파워 스펙트럼에 따른다. 반사 지점의 동작은 다른 어떠한 현상보다 수면 반사파의 주파수 확산에 따른 결과이다. 주파수 f 를 가지는 신호 성분의 도플러 확산은 단일 수면 반사가 입사각 Θ 가 $(0.0175/c)fw^{3/2}\cos\theta$ 일 때 발생함에 따라 일어난다. 여기서 c 는 음속으로써 일 반적으로 1500m/s 를 사용하고, w 는 풍속으로 단위는 m/s 이다. 이 관계는 그림 5에 나타나 있다.

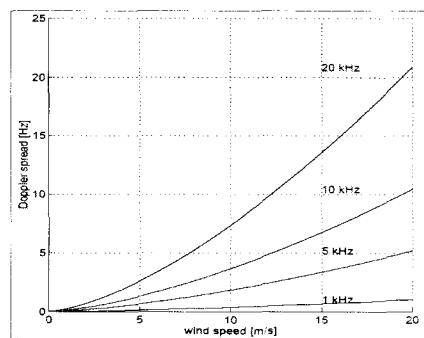


그림 5. 단일 수면 반사 경로의 도플러 확산.
Fig. 5 Doppler spreading of single surface reflection path.

여기에서 통신 거리는 수심보다 훨씬 커서 대부분의 통신 링크가 매우 크다는 경우로 $\cos \theta \approx 1$ 이라고 가정하였다. 수십 Hz의 도플러 확산은 높은 주파수를 사용하는 짧은 거리의 링크들에서 대부분 발견된다. 낮은 주파수를 사용한 장거리인 경우 도플러 확산은 매우 낮을 것이지만, 다중경로 확산은 증가할 것이다. 채널 확산 성분, 즉 도플러 확산과 다중경로 확산의 곱은 거리에 따라 감소할 것이라 예상할 수 있다.

그림 6에 수신된 토널 신호의 주파수 스펙트럼을 확대한 그림을 나타내었다. 도플러 확산 정도를 판단하기 위해 -3 dB를 기준으로 주파수 대역폭을 비교한다. 거리가 가장 짧은 약 0.2km의 경우 2.1Hz, 0.5~1.5km의 경우 3.1Hz의 대역이 확인되었다. 이 결과와 그림 5를 비교하면 실험 당시 풍속(wind speed)이 대략 5 m/s 내외였을 것으로 추정된다.

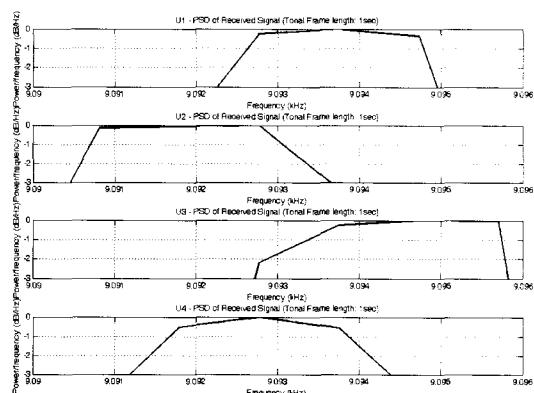


그림 6. 수신 신호의 확대 주파수 스펙트럼.
Fig. 6 Frequency spectrum of received signals.

IV. 잔향 효과 특성

해양에서 다중경로의 형태는 심해와 천해에 따라 다르고, 주파수와 전송 거리에 따라 변화한다. 이는 음파 전달의 이론과 모델에 기반하고 있으며 시스템의 위치에 따라 다중경로 전달의 여러 가지 전형적인 기법이 존재한다. 그것은 대부분 깊이 등의 여러 요인에 따라 전달 형태가 결정된다. 심해와 천해의 정의는 절대적인 경계가 있는 것은 아니지만, 일반적으로 100 m 정도의 깊이를 기준으로 정의를 내린다. 기본적으로 다중경로의 형태는 두 가지로 분류가 된다. 첫째는 경계면에서의 반사에 의한 것으로 바다의 수면이나 바닥에서의 신호 반사를 이용한 모델이다. 또 하나는 음선을 기초로 하는 모델이다(음속은 깊이의 함수이고 레이 오드 음파는 항상 낮은 전파 속도로 간다). 해안 영역이나 대륙의 암초 등이 존재하는 천해의 경우 전달은 가능한 직접 경로뿐만 아니라 경계면에서 발생하게 된다. 그러나 대륙의 암초 등이 영향을 주지 않는 심해의 경우 음파 채널은 최소 음속이 도달하는 지역으로 레이가 발생한다. 반사 손실이 일어나지 않으면 음파는 수천 킬로미터를 전송할 수 있다. 대신에 위쪽으로 뻗는 레이는 반사되는 수면의 한 점에 집중되고, 그 과정이 주기적으로 반복된다. 수면에서 반사되는 두 점 사이의 영역을 수렴 영역(convergence zone)이라 부르고 이는 일반적으로 60-100 km의 길이를 가진다. 다중경로 전달과 그의 공간적 의존의 구조는 통신시스템에서 매우 중요하기 때문에 다중경로를 억제하기 위해 배열 신호처리를 사용한다. 이러한 시스템은 다중경로의 형태를 추정하기 위한 전달 모델을 사용하여 설계한다.

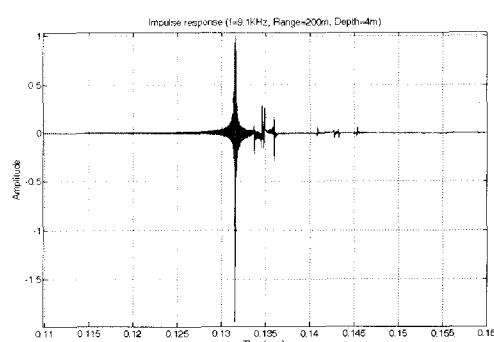


그림 7. 임펄스 응답(Ray mode, 0.2km).
Fig. 7 Impulse response(Ray mode, 0.2km).

음선 이론과 일반적 모드 이론은 그러한 전달 모델링의 기본이 된다. 최근의 문헌들은 일반적으로 통신 채널을 모델링하기 위해 미완성의 다중경로 구조를 결정하기 위한 Ray Tracing을 사용한다[5-9]. 그에 따라 본 잔향음 분석에서는 레이 모드 음과 모델을 이용해 실험에서와 동일한 데이터로 시뮬레이션을 수행한 이후 실제 획득 데이터를 이용하여 분석하였다.

그림 7에 0.2 km 거리에서 시뮬레이션을 통해 획득한 임펄스 응답을 나타내었다.

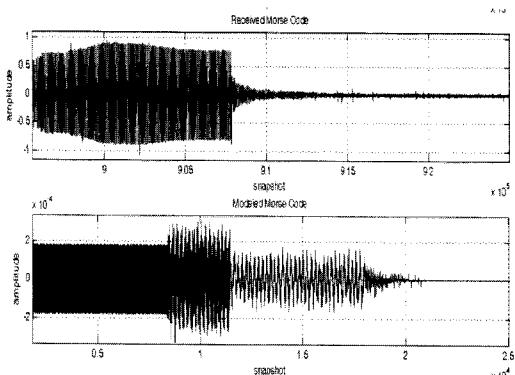


그림 8. 신호의 잔향 효과.

Fig. 8 Reverberation effects of signal.

그림 8에서는 약 0.2 km의 경우에 대한 잔향효과를 나타내었다. 상단의 그림은 실제 실험을 통해 수신한 데이터이며, 하단의 그림은 모델을 통해 획득한 임펄스 응답을 이용한 경우이다. 실제의 경우보다 모델을 통한 시뮬레이션의 결과가 잔향음이 더 길게 존재하는 것을 알 수 있다. 즉, 본 실험에서의 경우 다중 경로의 효과가 모델링과는 다소 차이가 발생하였고, 실제로는 효과가 적었음이 확인되었다.

그림 9에서는 세 펄스의 잔향 특성이 나타나고 있는데, 세 펄스 모두 비슷한 잔향 특성을 보여주고 있다. 신호가 수신된 이 후 가장 큰 세기의 잔향 신호들이 대략 0.003초 이내에 입사되는 것을 볼 수 있는데 이는 그림 7에 나타낸 채널 임펄스 특성과 비교해 보면 어느 정도 일치하는 결과로 볼 수 있다. 즉, 그림 7를 보면 초기 직접파가 도달한 후 약 3 msec후에 다중경로 신호가 도달하는 것으로 나타나고 있다. 또한 이 후 잔향 꼬리들이 입사되고 있다.

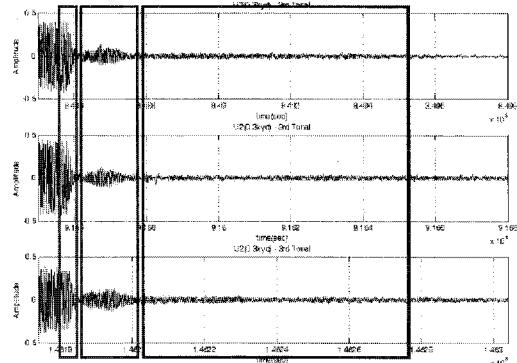


그림 9. 같은 길이 펄스의 잔향 효과.
Fig. 9 Reverberation effects of same length pulse.

V. 채널의 신호 전달 특성

실험을 수행한 수중 채널의 신호 전달 특성을 분석하기 위해 본 절에서는 LMS(Least Mean Squared) 알고리즘을 사용하는 적응형 필터를 이용하였다. LMS 알고리즘은 주로 적응형 필터(adaptive filter)로써 필터링 효과를 위해 사용하지만, 알고리즘 구조 내의 가중치들을 통해 시스템의 특성을 추정할 수 있기 때문에 수중 채널의 전달 특성을 간접적으로 파악할 수 있다. 시스템 인식(identification)을 위한 적응형 필터 모델은 그림 10과 같이 표현된다[10].

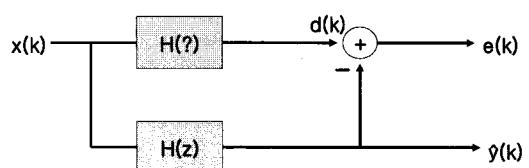


그림 10. 적응형 필터구조.
Fig. 10 Structure of adaptive filter.

여기에서, 각각의 라벨은 아래와 같다.

$$d(k) = \text{received signal}$$

$$x(k) = \text{original signal}$$

$$e(k) = \text{error}, \hat{y}(k) = \text{filtered signal}$$

$$H(z) = \text{Transfer function}$$

$d(k)$ 는 수신 신호로써 우리가 획득한 데이터이다. 이 데이터는 송신된 신호 $x(k)$ 가 우리가 알지 못하는 $H(?)$ 라는 특성을 갖는 수중 채널을 거쳐서 수신된다. LMS 알고리즘은 이 $H(?)$ 라는 시스템 특성에 근사한 $H(z)$ 값을 찾음으로써 $H(?)$ 를 추정하는 알고리즘이다. 원 신호 $x(k)$ 는 계속해서 값을 업데이트 하는 $H(z)$ 의 전달 함수를 거쳐 수신 신호와의 오차값을 계산한 이후 이 오차 값을 계속 줄여나가 0값에 가깝게 수렴시킴으로써 $H(?)$ 를 추정한다. 만약 오차 $e(k)$ 가 0이라면 $H(z) = H(?)$ 이 되어 필터 $H(z)$ 의 주파수 특성이 곧 수중전달채널 $H(?)$ 이 된다. 이 알고리즘으로부터 채널을 추정하는 LMS 알고리즘의 시스템 블록선도가 그림 11에 나타나 있다.

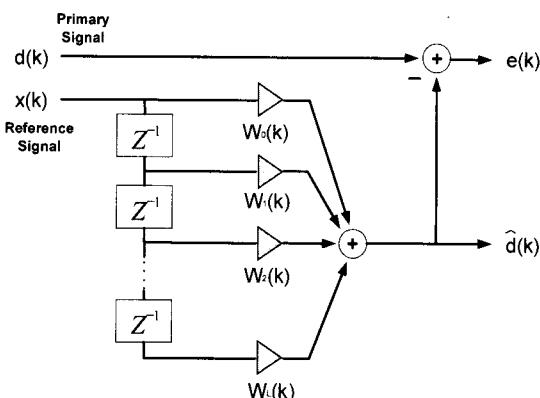


그림 11. 채널 추정을 위한 LMS 알고리즘 시스템 블록선도.

Fig. 11 LMS algorithm system block diagram for channel estimation.

$$w_l(k+1) = w_l(k) + 2\mu e(k)x(k-l), \\ l = 0, 1, \dots, L$$

$d(k)$ = received signal,

$x(k)$ = original signal,

$\hat{d}(k)$ = filtered signal, $e(k)$ = error

즉, 이로부터 구해지는 가중치 값인 w 값들이 결국 시스템의 임펄스 응답이 되는 것이다. 그림 12에는 실험에 사용된 LFM 신호를 이용하여 LMS 알고리즘을 거쳐 거의 수렴된 후의 결과를 나타내었다.

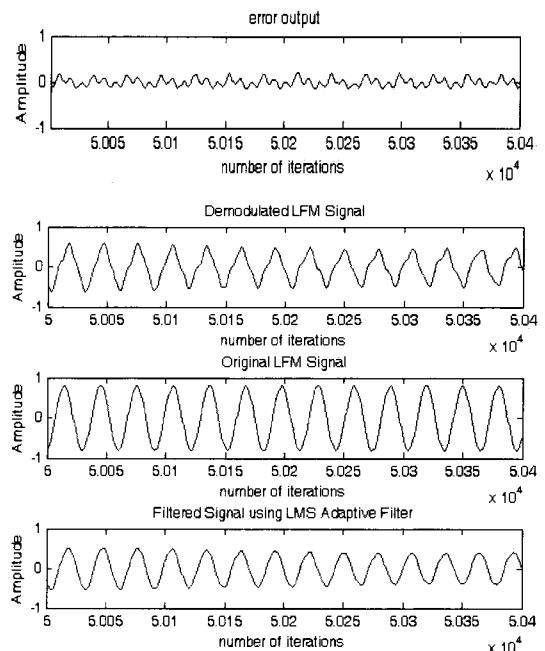


그림 12. LFM 신호를 이용한 시스템
Identification 결과.

Fig. 12 System identification results using LFM signal.

그림 12의 첫 번째 그림에서는 LMS 알고리즘의 오차 출력을 보여주고 있다. $H(z)$ 가 일정 시간 업데이트를 거친 이후이며, 거의 0의 값으로 수렴하고 있는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 그림은 수신 후 복조된 LFM 신호이며, 세 번째는 원래의 LFM 신호이다. 네 번째 그림에서는 이러한 LMS 알고리즘을 거쳐 필터링 된 신호를 보여주고 있다. 수신된 신호보다 원 신호에 매우 근사함을 확인할 수 있다. 즉, 설계된 시스템이 실제 실험에서의 수중 채널 특성에 많이 접근하였다는 것을 의미한다.

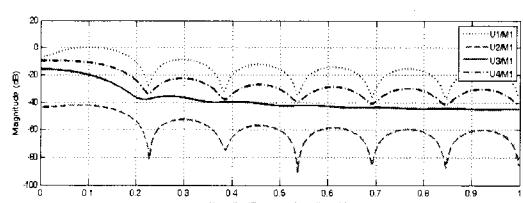


그림 13. 4가지 거리에 따른 주파수 응답
(토널 신호).

Fig. 13 Frequency response for each 4 distance
(tonal signal).

토널 신호와 LFM 신호 두 가지를 이용하여 설계된 시스템으로 채널의 전달 특성을 분석하였다. 그림 13과 그림 14에 토널 신호와 LFM신호에 대한 주파수 응답을 나타내었다.

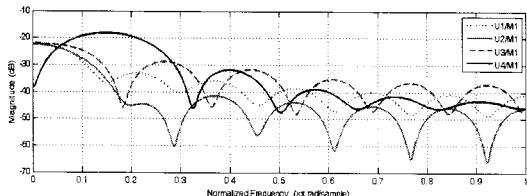


그림 14. 4가지 거리에 따른 주파수 응답
(LFM 신호).

Fig. 14 Frequency response for each 4 distance
(LFM signal).

거리에 따라서 주파수 응답의 레벨 차이와 대역 차이는 약간 있으나, 토널 신호와 LFM 신호 모두 저역통과 특성의 채널 주파수 응답 특성을 보여주고 있다. 이는 동일한 거리에서 주파수가 높아질수록 감쇠가 크다는 것을 의미한다.

VI. 결론 및 논의

본 논문에서는 수중 통신 신호 전달 특성을 파악하기 위해 채널 환경의 영향에 대한 분석을 수행하였다. 채널 환경의 영향은 도플러 확산과 천이, 잔향음의 특성과 전달 특성 유출을 통해 수행할 수 있다. 도플러 천이를 통해 계산된 속도는 배의 운항 속도보다 조금 빠르게 나왔지만, 이는 조류에 의한 것으로 판단되었으며 운항 속도의 증가에 따라 선형적으로 함께 증가하였다. 잔향음은 레이 모드 모델을 이용한 시뮬레이션과 비교하여 유사한 결과를 보여주었다. 또한 채널 특성은 저역 통과 특성을 보이며, 고주파 신호의 손실 특성을 보여주었다. 결과적으로 수중 통신에 있어서 잔향과 배에서 방사되는 잡음이 가장 큰 장애 요인임을 확인하였으며, 이외에도 해양 생물체에 의한 잡음이 포함되어 있었다. 따라서 추후 수중통신용 모뎀의 성능 개선을 위해서는 이러한 요인들을 극복할 수 있는 방법들에 대한 연구가 필요할 것으로 보이며, 이상의 결과를 고려한다면 고품질 음성 통신을 위한 수중 SSB 모뎀의 설계가 가능할 것이다.

참고문헌

- [1] A. Baggeroer, "Acoustic telemetry - an overview," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.9, no.4, pp.229-235, Oct. 1984.
- [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] 주형준, 한정우, 김기만, "천해에서 SSB 모뎀의 실험 결과 분석," 한국해양정보통신학회논문지, vol.12, no.6, pp.990-998, June, 2008.
- [4] L. Berkhevskikh and Y. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, New York: Springer, 1982.
- [5] S. Flatte, Ed., *Sound Transmission Through a Fluctuating Ocean*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1979.
- [6] J. Catipovic, "Performance limitations in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 15, pp. 205-216, July 1990.
- [7] R.H. Owen, B.V. Smith and R.F.W. Coates, "An experimental study of rough surface scattering and its effects on communication coherence," in *Proc. OCEANS'94*, pp.III.483-III.488, Brest, France, Sept. 1994.
- [8] A. Essebbar, G.Loubet and F.Vial, "Underwater Acoustic Channel Simulations for Communication," in *Proc. OCEANS'94*, pp.III.495-III.500, Brest, France, Sept. 1994.
- [9] A. Falahati, B. Woodward and S. Bateman, "Underwater acoustic channel models for 4800 b/s QPSK signals," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.16, pp.12-20, Jan. 1991.
- [10] Harry L. and Van Trees, *Optimum Array Processing*, Wiley Publication, 2001.

저자소개



주형준(Hyung-jun Ju)

2004년 2월 : 한국해양대학교
전파공학과 (공학사)
2006년 2월 : 한국해양대학교
전파공학과 (공학석사)
2006년 3월~현재 : 한국해양대학교 전파공학과
박사과정

※ 관심분야 : 수중통신, 소나 신호처리, 임향음 제거,
센서 네트워크, DSP 및 FPGA 시스템 설계



한정우(Jung-woo Han)

2007년 2월 : 한국해양대학교
전파공학과 (공학사)
]2007년 3월~현재 : 한국해양대학교
전파공학과 석사과정

※ 관심분야 : 수중통신, DSP, 마이크로프로세서 하드웨어 구현



김기만(Ki-man Kim)

1988년 2월 : 연세대학교 전자공학과
(공학사)
1990년 8월 : 연세대학교 전자공학과
(공학석사)

1995년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1996년 8월 : 연세대학교 의과대학 의용공
학교실 (Fellow)
1996년 9월~현재 : 한국해양대학교 전파공학과 교수
※ 관심분야 : 수중통신, 소나 신호처리, 3차원 음향제어,
채널 추정, DSP 및 CPLD 구현