

등화기를 이용한 천해에서의 수중통신

Communication Under the Shallow Water Using an Equalizer

윤 병 우*, 신 윤 기*, 성 평 모**

(Byungwoo Yoon, Yoonki Shin, Koengmo Sung)

요 약

수중 채널은 그 음향학적 특성상 물의 깊이, 온도 분포, 염분포 등의 환경적 특성과 주위의 경계조건, 표면 상태 등 지형적 조건들로 구성되는 시변 시스템(time varying system)으로 볼 수 있다.

특히 천해(shallow water)의 경우 물표면과 바닥이 하나의 도파관 구실을 하게되므로 multipath reflection으로 인한 echo 현상이 심각하다. 따라서 천해에서의 수중 통신은, time varying multipath fading 특성의 수중 채널에 의해 왜곡된 음향 신호를 등화(equalizing)시키는 것이 수중 통신의 질을 높이는데 결정적이라 할 수 있다.

본논문에서는 주파수 영역 적응 필터를 채택하여 Inverse modeling 기법으로 수중채널을 등화시키는 시스템을 제시하였으며 시뮬레이션으로 이들의 타당성을 조사하였다.

ABSTRACT

Underwater channels can be regarded as time-varying systems in view of the acoustical characteristics due to the fact that the characteristics of the channel are affected by the environmental and geometrical conditions.

Especially in shallow water case, the surface and bottom conduct as a waveguide so echo effect due to the multipath reflections are severe.

Therefore in shallow water communications, it is very important to equalize the transmitted signals distorted by the underwater channels with time-varying multipath fading.

In this paper an equalizer system which employs the frequency domain adaptive filter to equalize the channels using inverse modeling technique is introduced.

I. 서 론

* 부산대학교 전자공학과

** 서울대학교 전자공학과

중요성이 매우 커지고 있다. 이러한 이유로 해양에 대한 탐구 및 그 실용화에 대한 꾸준한 연구가 수행되어 왔으나¹⁾, 다른 분야에 비하여 해양의 개발은 상대적으로 미흡하다고 볼 수 있을 것이다. 이에는 여러 가지 이유가 있을 것이나, 그 중에서도 수중에서의 통신의 어려움을 주요한 요인으로 지적할 수 있을 것이다. 즉 수중에서는 음파만이 유일한 통신 수단이라는 점과, 그 통신 과정에서 여러 가지 어려움이 뒤따른다는 것으로 이에 대한 연구도 크게 아래의 두 부류로 나뉘진다.

첫째, 수중에서 효과적으로 정보를 전송할 수 있는 송수신기의 개발²⁾, 둘째, 수중 채널의 복잡한 특성 및 잡음으로부터 신호에 포함된 정보를 보호하기 위한 신호 처리에 대한 연구³⁾이다. 특히 천해(shallow water)의 통신은 물 표면과 바닥이 하나의 도파관 구실을 함으로써 다중반사(multipath reflection)로 인한 echo현상이 신호를 심하게 왜곡시키는 점이 큰 문제가 된다.

본 논문에서는 천해에서의 diver-diver, diver-station, station-station간의 근거리 수중 통신에서 문제가 되는 multipath fading 현상을 적응 필터를 채택하여 해결하고자 한다.

II. 수중 채널의 음향학적 특성 및 등화

1. 음향학적 특성

수중에서의 음향 전파 특성은 아주 복잡한 요인들로 결정된다. 음속의 경우 물의 깊이, 온도 분포, 염분포 등의 함수이며 그 외에도 주위의 경계 조건, 표면 상태, 바닥의 상태등도 음향 전파에 중요한 영향을 미친다. 특히 천해의 경우 물 표면에서의 반사는 아주 정적인 반사체로 부터 아주 random 양상으로 음파를 분산시키는 격렬한 상태까지 다양하며⁴⁾, 바닥에서의 반사 손실 또한, 바닥이 서로 다른 여러 가지 재질들이 다층 구조를 이루고 있음으로 해서 음파의 반사도 반사 계수의 크기 및 위상 편이가 주파수와 입사각의 복합 함수로 복잡한 양상을 띤다⁵⁾. 끝으로 매질에 의한 흡음 손실(absorption loss)은 근거리 통신의 경우 기하학적인 전송 손실(spherical spreading loss)에 비하여 훨씬 작다⁶⁾.

따라서 100m 이내의 근거리 수중 통신을 목표로 하는 본 연구에서는 천해 채널에서의 multipath fading, spherical spreading loss 및 표면과 바닥 반사등이 중요한 변수로 작용한다.

2. 수중 채널의 등화(equalizing)

수중 채널을 통과하면서 왜곡된 신호를 inverse filtering을 이용하여 등화하기 위해서 본논문에서는 다음과 같은 시스템을 이용하였다.

송신단에서는 message 신호를 전송하기 전에 스위치가 sync 펄스에 의해 A에 접속됨으로써 일종의 테스트 신호인 pilot 신호를 일정한 시간(1초 이내) 동안 전송한후 message 신호를 내보내게 된다. (스위치는 B에 접속됨). 먼저 전송된 pilot 신호는 변조된 후 수중 채널을 통과하면서 왜곡될 것이며, 이 왜곡된 pilot 신호를 수신한 수신단에서는 이를 다시 복조한 후 수신단 자체에서 발생하는 기준 pilot 신호와 비교함으로써 적응 필터는 채널에 대한 inverse model을 형성하게 된다. 그런 다음에 같은 채널을 통하여 수신된 message 신호를 이미 형성해 놓은 inverse model을 이용하여 등화시키는 것이다. 특히 전자기파에 비하여 음파는 그 전파 속도가 매우 느리므로 수중 채널에 대한 inverse model은 그 차수가 충분히 높은 것이 좋다. 따라서 본논문에서는 차수가 높을 수록 유리한 주파수 영역 적응 필터를 이용하여 inverse model을 형성하고자 한다.

주파수 영역 적응 필터는 시간 영역상의 convolution을 주파수 영역상의 곱셈으로 대체할 수 있음으로 해서 계산량을 대폭 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 특히 이 과정에서 FFT 알고리즘을 이용함으로써 DFT에 비해 계산량을 더욱 축소시킬 수 있다. 더우기 최근 들어 속속 발표되고 있는 FFT용 DSP 칩을 이용함으로써 시스템 구성이 한결 용이하게 되었다.

III. 수중 통신 시스템의 설계

본문문의 수중 통신 시스템에서는 FFT용 DSP 칩을 이용하기 위해 신호처리상 및 hardware 구현상의 편의를 위하여 표본화 주파수를 2의 거듭인 1

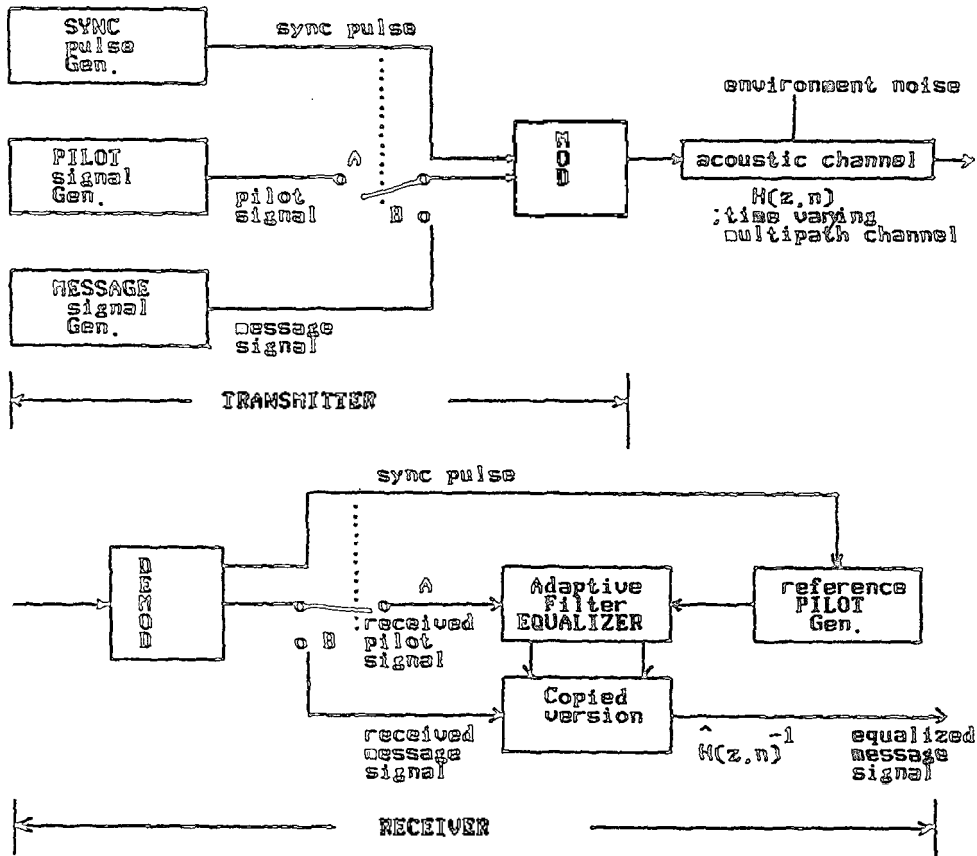


그림 1. 수중 채널의 동화
Equalization of the acoustic channel

0.24KHz로 하였다. 이 주파수는 audio 범위내의 message 신호에 대한 Nyquist rate도 충분히 만족시키는 값이다.

1. 송신단

송신단 시스템의 구성도 및 각부 파형은 다음의 그림 2와 같다.

Sync 펄스 발생기는 송신 초반에 pilot start pulse (이하 PSP)를 발생시켜 pilot 신호가 존재하는 구간의 시작을 알리게 되며 이 펄스가 끝난지 0.5초 후에 발생하는 message start pulse(이하 MSP)는 message 신호가 시작하는 구간의 시작을 알리게 된다. 이 PSP, MSP는 전송 전에 각각 f_1, f_2 Hz의 pilot start burst(이하 PSB)와 message start burst(이하 MSP)로 각각 ASK 변조된 후 다시 최종적으로 반송 주파수 f_c Hz로 AM 변조되어 송출된다.

Sync 펄스에 동기되어 발생하는 톱니파는 한 주기가 0.05초로 모두 10개의 주기로 구성되게 된다. 이 톱니파가 FM 변조를 거쳐 pilot 신호로 변환 후 반송 주파수 f_c Hz로 AM 변조되어 송출된다.

(A)의 PSP의 끝 부분부터 MSP의 시작 부분까지 지속되는 pilot 신호는 수신단에 수신된 후 수신단 자체에서 발생하는 기준 pilot 신호와 함께 비교되어 수중 채널에 대한 inverse model을 형성하는데 기여하게 된다.

0.5 초 동안에 pilot 신호가 전송된 후 MSP가 끝나는 순간 부터 message 신호가 전송되기 시작하여 수중채널을 통하여 수신단에 수신된 후 앞서 pilot 신호에 의하여 0.5초 동안에 형성된 inverse model을 통과함으로써 동화가 되는 것이다. 따라서 pilot 신호는 message 신호가 포함하고 있는 주파수 성분을 모두 포함하기 위하여 톱니파 파형을 FM

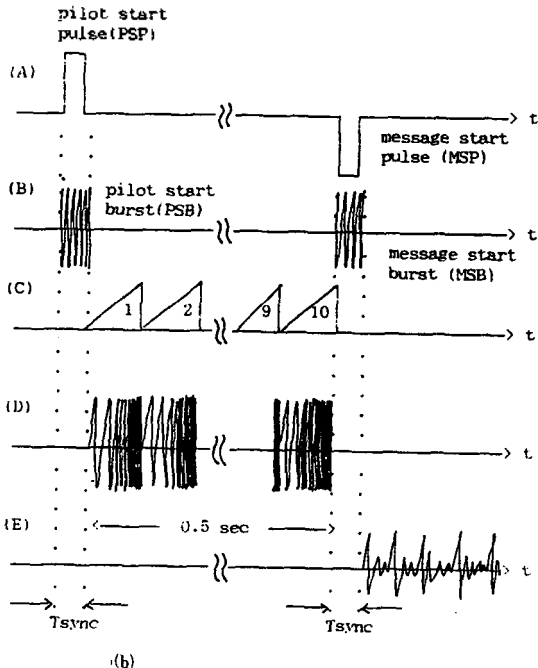
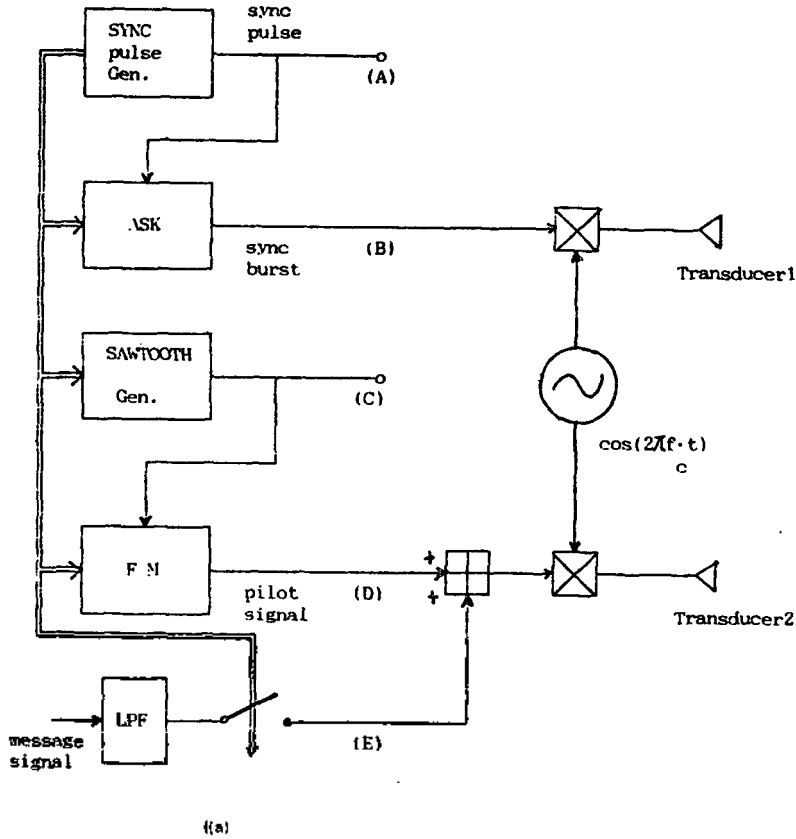


그림2. (a) 송신단 시스템 구성도
(a) System configuration of the transmitter
(b) 각부 파형
(b) Waveforms

변조 시킬 때 다음 그림3과 같은 관계를 갖도록 한다.

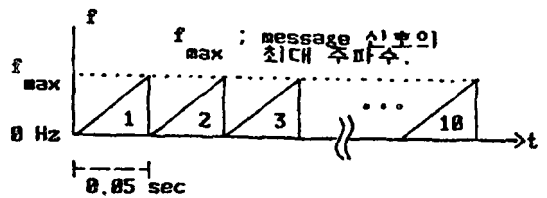


그림3. 톨니파 파형의 FM 변조
FM modulation of sawtooth waveform

이 경우 pilot 신호의 spectrum은 그림4와 같다. 일반적으로 음성 신호는 4KHz이내이므로 $f_{max} > 4KHz$ 만 만족하면 된다.

다음으로 PSP가 존재하는 T_{sync} 시간동안에는 수신측에서 pilot 신호를 처리하기 위한 초기화 작업이 이루어지며, MSP가 존재하는 T_{sync} 시간 동안에는 수신측에서는 message 신호를 처리하기 위한 초기화 작업이 이루어지게 된다. 따라서 시간 T_{sync}

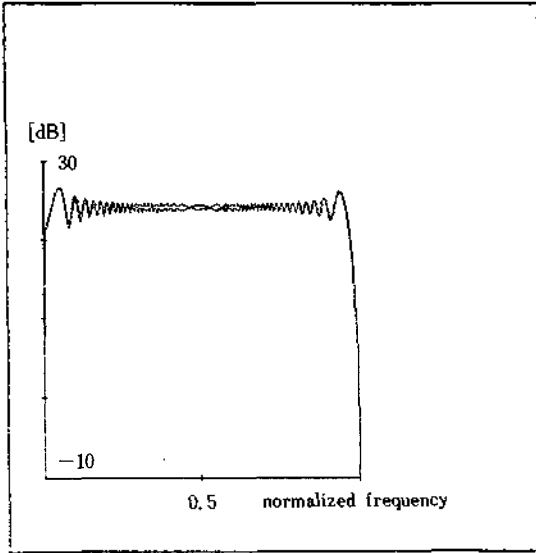


그림4. Pilot 신호의 스펙트럼
Spectrum of pilot signal

는 sync 펄스의 전송 대역 뿐만 아니라 수신측에서 DSP 칩이 각각의 신호를 처리하기 전의 초기화 작업을 할 수 있는 시간적인 여유를 결정하게 되는 것이다.

이상의 사항을 종합하면 Transducer 1, Transducer 2의 출력 스펙트럼은 다음 그림5와 같다.

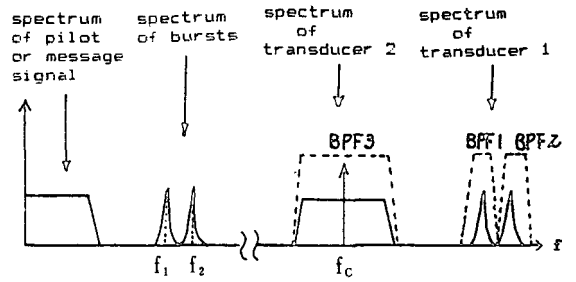


그림5. 송신단의 각부 스펙트럼
Spectra of the transmitter

2. 수신단

수신단의 시스템 구성은 다음과 같다.

송신단으로 부터 수신된 PSP 및 MSP와 이를 이용하여 수신단에 발생하는 RPSP 및 RMSP의 시간상의 관계는 다음의 그림 7과 같다.

RPSP가 LOW 상태가 되는 순간 돌너과 발생기가 동작하여 주기가 0.05초인 기준 pilot 신호를 0.5초 동안 발생시킨다. 그림7에서 RPSP는 PSP에 비하여 $T=0.05/4$ 초 만큼 지연된 후 LOW상태로 전환됨으로써 수신단의 기준 Pilot 신호는 수신된 pilot 신호에 비하여 T만큼 지연되는 것이다. 이 지연시간은 pilot 신호의 한주기의 1/4에 해당하며, 시스템의

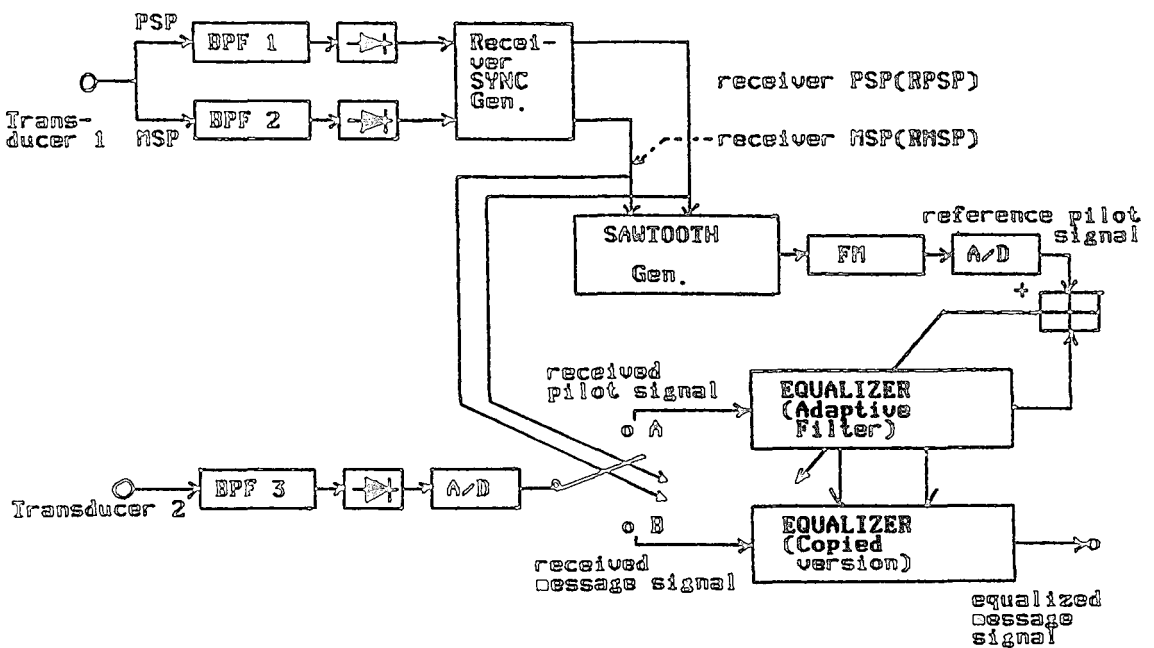


그림6. 수신단 시스템의 구성도.
System configuration of the receiver

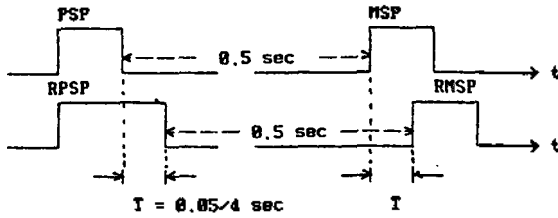


그림7. 수신단에 수신된 동기 신호 및 수신단에서 발생하는 동기 신호와의 관계
Relation between the sync pulses received at the receiver and those generated at the receiver.

표본화 주파수를 10.24KHz로 정하였으므로 T시간은 표본 갯수로는 128개에 해당한다.

이와 같이 지연된 기준 pilot 신호를 사용하는 이유는 수신단의 적응 필터는 등화기로서 전송 채널에 대한 inverse model로 수립해야 하나, 일반적인 채널이 반드시 minimum-phase 시스템이라고는 볼 수 없으므로 nonminimum-phase 시스템을 inverse 할 경우 생기는 stable noncausal 시스템을 physically realizable한 causal 시스템으로 전환시키기 위해 inverse model의 impulse response를 적당한 길이로 windowing한 후 지연시킴으로써 가능하게 하는 것이 inverse modeling에서의 일반적인 방법이 기 때문이다²⁾. 또한 본논문에서는 FFT를 이용하여 주파수 영역의 적응 필터로서 등화기를 구성하고자 한다. 따라서 pilot 신호의 한 주기를 0.05초로 함으로써 표본화 주파수 10.24KHz로 A/D 변환된 pilot 신호는 한 주기가 512 point가 되며 이를 이용하면 FFT 시스템 구성이 한결 용이해 진다. 시간 영역상

의 차수가 N차인 적응 필터를 주파수 영역으로 옮겨 FFT로 처리하면 2N point FFT가 요구된다. 본논문에서는 주파수 영역상에서 512 point FFT를 사용하고자 하므로 결국 이에 등가되는 시간 영역상의 적응 필터는 impulse response의 길이가 256 point가 되며 이것의 절반인 128 point만큼 기준 pilot 신호를 지연 시킨 것이다.

다음으로 RMSP가 HIGH 상태로 전환되는 순간 적응 필터의 동작이 중지되며 동시에 스위치가 B로 바뀌어 접속되면서 pilot 신호에 의해 형성된 등화기에 의해 message 신호가 등화되기 시작하는 것이다.

등화기를 구성하는 적응 필터의 구조 및 내부에서의 신호의 흐름은 다음의 그림8과 같다.

기준 pilot 신호에 대한 추정 출력의 FFT Y는

$$Y_k = W_k^T X_k \tag{1}$$

이며 여기서는 X_k 는 대각선 행렬로서 각 인자들은 수신된 pilot 신호의 FFT이다. W_k 는 등화기의 총격 응답의 FFT이며, 주파수 영역상의 추정 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$E_k = H(D_k - Y_k) = H(D_k - W_k^T X_k) \tag{2}$$

단 여기서 행렬 h는 대각선 행렬로서

$$h = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \text{II} \end{pmatrix}$$

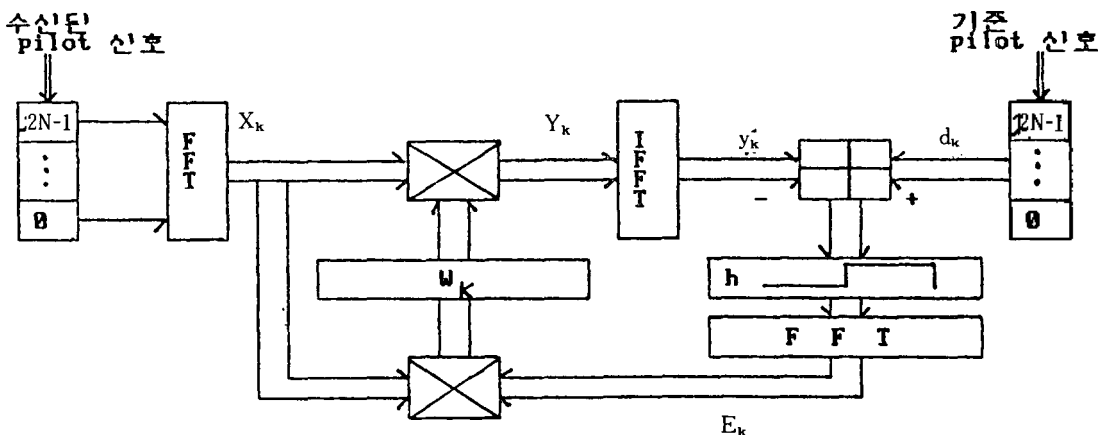


그림8. 주파수 영역 적응 필터
Frequency-domain adaptive filter.

이며 FFT가 가지는 circulant convolution 성질을 linear convolution으로 바꾸는 역할을 한다. 그리고 H는 순환 행렬로서 그의 첫번째 행은 벡터, $[0, 0, \dots, 0, 1, 1, \dots, 1]$ 의 FFT이다.

(N points) (N points)

이상의 각 사항으로부터 다음과 같은 알고리즘이 유도된다⁸⁾.

$$W_k = W_k + G_k X_k^* E_k$$

$$G_k = \begin{bmatrix} g_k(0), & & & & & \\ & g_k(1), & & & & \\ & & g_k(2), & & & \\ & & & \dots & & \\ & & & & & g_k(2N-1) \end{bmatrix}$$

여기서,

$$g_k(i) = \frac{a}{z_k(i)}$$

$$z_k(i) = (1-b)z_k(i) + bX_k(i)X_k^*(i),$$

i = 주파수 index,

a = 수렴 상수,

b = 에너지 완화 상수

이다. (*는 행렬의 transpose conjugate를 의미한다.)

IV. 전산 시뮬레이션 및 검토.

<시뮬레이션 1>

다음의 그림9와 같은 조건하에서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

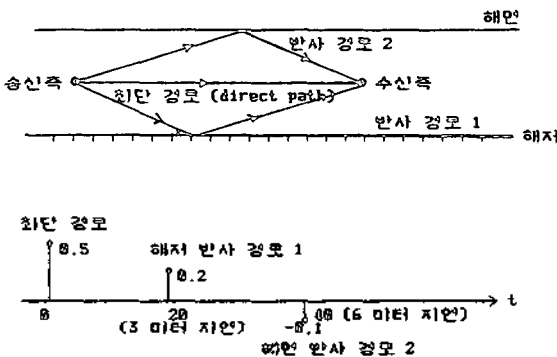
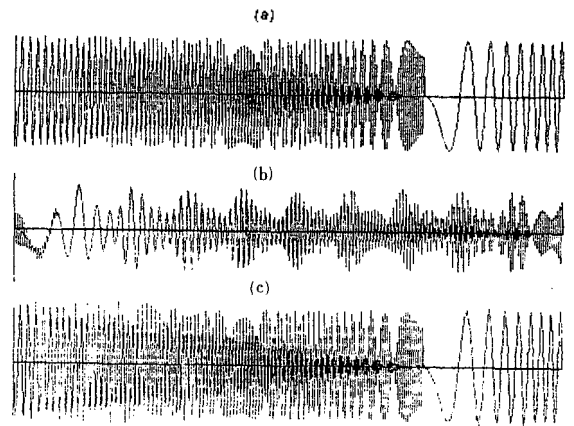


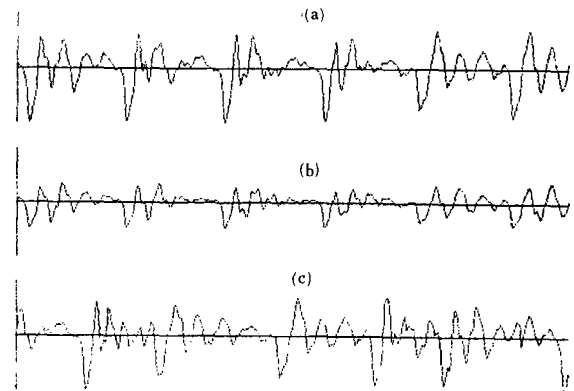
그림9. 전송로의 특성
Characteristics of the transmission path

위와 같은 조건하에서 등화기인 적응 필터의 차수 N은 256차로 하였으며, 전송도중에 섞이는 잡음은 백색 잡음으로 하였고 신호 대 잡음비는 각각 ∞ 및 15dB의 두가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 각각 그림 10, 11에 나타나 있다.

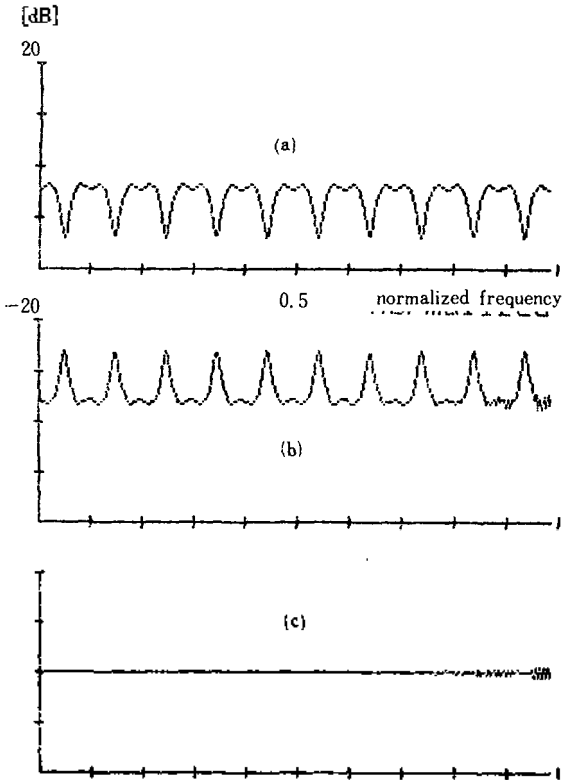
그림 10의 (C)의 (C)에서와 같이 잡음이 없을 경우에는 등화기의 결과가 거의 이상적이되므로 이 사실은 등화기의 동작이 정상적임을 의미하며 잡음이 존재할시는 그림 11의 (C)의 (C)에서와 같이 등화기 특성에 약간의 오차가 발생함을 알 수 있다.



(A) pilot 신호 파형
(a) 원 pilot 신호
(b) 수신된 pilot 신호
(c) 등화된 pilot 신호

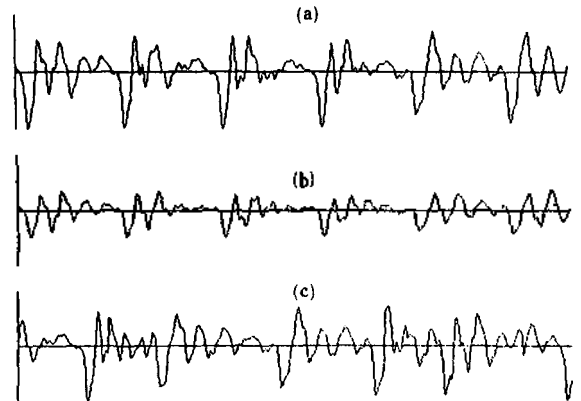


(B) message 신호 파형
(a) 원 message 신호
(b) 수신된 message 신호
(c) 등화된 message 신호

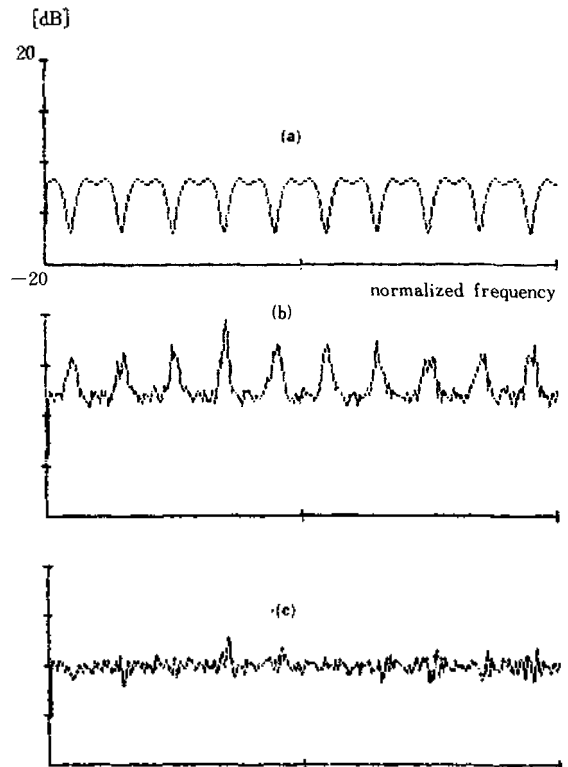


(C) 전달 특성
 (a) 전송로 전달 특성
 (b) 등화기 전달 특성
 (c) 전체 전달 특성

그림 10. 신호 대 잡음비가 ∞ dB인 경우
 SNR is ∞ dB.

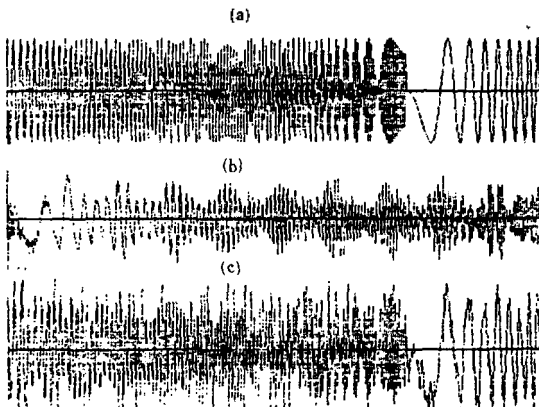


(B) message 신호 파형
 (a) 원 message 신호
 (b) 수신된 message 신호
 (c) 등화된 message 신호



(C) 전달 특성
 (a) 전송로 전달 특성
 (b) 등화기 전달 특성
 (c) 전체 전달 특성

그림 11. 신호 대 잡음비가 15dB 인 경우
 SNR is 15dB.



(A) pilot 신호 파형
 (a) 원 pilot 신호
 (b) 수신된 pilot 신호
 (c) 등화된 pilot 신호

<시뮬레이션 2>

다음의 그림12와 같은 조건하에서 변산 시뮬레이션을 수행하였다.

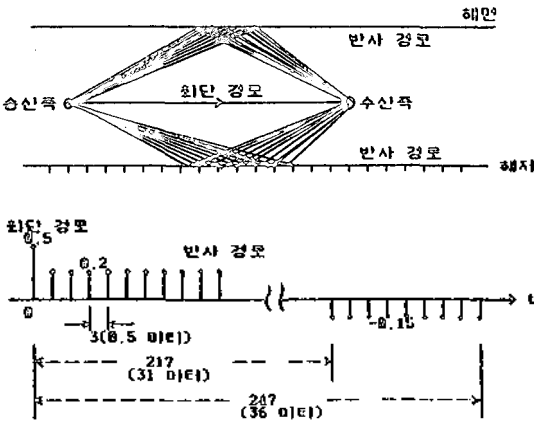
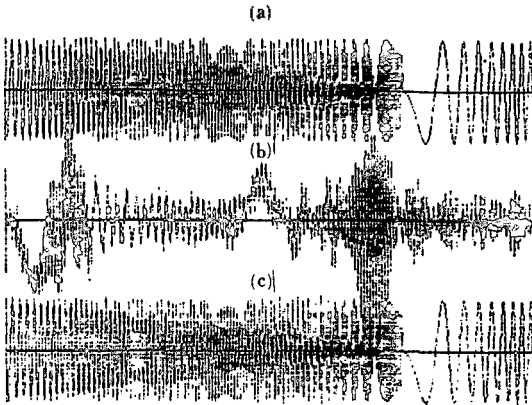
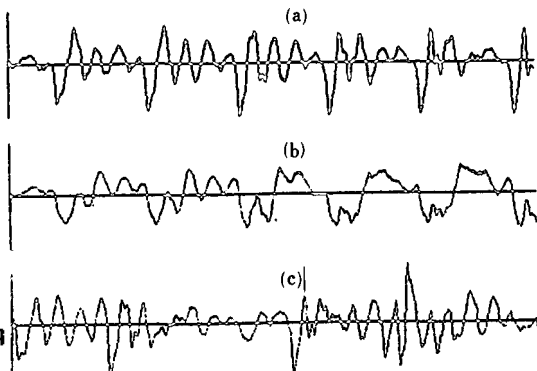


그림 12. 전송로의 특성
Characteristics of the transmission path

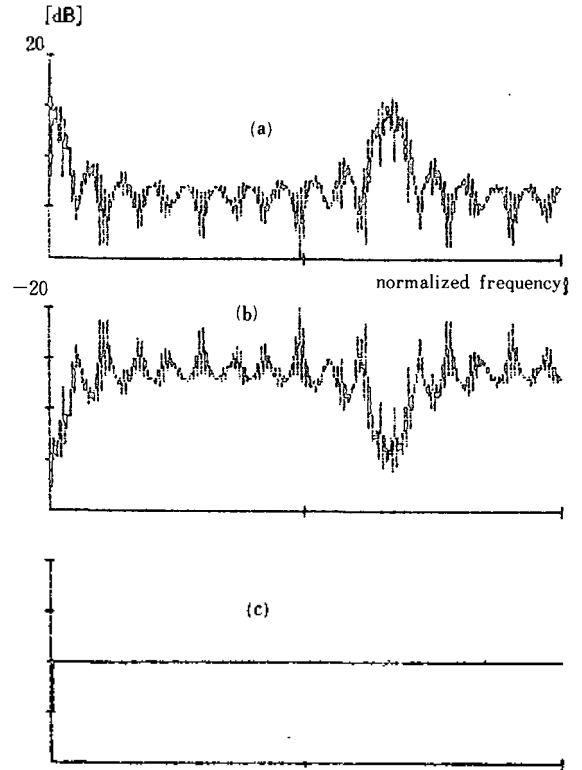
위와 같은 조건하에서 등화기인 적응필터의 차수 N은 256차로 하였으며, 전송도중에 섞이는 잡음은 없는 상태로 하였다. 그 결과는 그림 13에 나타나있다.



(A) pilot 신호 파형
(a) 원 pilot 신호
(b) 수신된 pilot 신호
(c) 등화된 pilot 신호



(B) message 신호 파형
(a) 원 message 신호
(b) 수신된 message 신호
(c) 등화된 message 신호



(C) 전달 특성
(a) 전송로 전달 특성
(b) 등화기 전달 특성
(c) 전체 전달 특성
그림 13. 신호 대 잡음비가 ∞ dB 인 경우
SNR is ∞ dB.

V. 결 론

이상의 결과에서 알 수 있듯이 주파수 영역 적응 필터를 이용한 수중 채널의 등화는 그 성능이 우수할 뿐만 아니라 시간 영역상의 적응 필터에 비하여 계산량 면에서 아주 탁월하며⁶⁾, 특히 최근 들어 발표되고 있는 FFT 전용 칩을 사용함으로써 하드웨어 구현에서의 문제점들이 간단히 해결될 수 있다.

앞으로 할 일은 본논문의 시뮬레이션 결과를 이용하여 본논문에서 제시한 전체 시스템을 하드웨어로 구현하는 일이다.

참 고 문 헌

1. Clarence S. Clay, Acoustical Oceanography: Principles and Applications. John Wiley & Sons, Inc. 1977.
2. T.F. Hueter, "Twenty years in Underwater acoustics: generation and receptions", JASA vol.51 #3 (part

2), 1972. pp 1025-1040.

3. Leif Bjorno, Under water Acoustics and Signal Processing, D.Publishing Co. Denmark, 1980.

4. Marsh, H.W., "Exact solution of wave scattering by irregular surfaces", JASA, vol. 33, pp 330, 1961.

5. Weinberg, H., "Generic sonar model" Naval Underwater Systems Center Technical document 5971-A, Feb.27, 1980.

6. Thorp, W.H., "Deep ocean sound attenuation in the sub and low-kyclocycle per second region", JASA, vol 38, pp 648, 1961.

7. B. Widrow, S.D.Steam, Adaptive Signal Processing, Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.

8. D.Mansour, A.H. Gray, JR., "Unconstrained frequency domain adaptive filter", IEEE Trans., Acoust. Speech Signal Processing, vol. ASSP-30, no. 5, ct.1982.

▲尹炳愚



1961년 1월 27日生
 1987년 2월 부산대학교 전자공학과 졸업
 1989년 2월 동대학원 석사 학위 취득
 현재 : 부산대학교 전자공학과 조교, 박사학위 재학 중
 ※주관심분야는 신호처리, 적응필터 등.

▲辛潤烈



1957년 1월 2일생
 1979년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업
 1987년 2월 서울대학교 전자공학과 박사학위 취득.
 현재 : 부산대학교 전자공학과 조교수
 ※주관심분야는 신호처리적응필터 및 수중통신 등임

▲성평모 : 7 권1호 참조