
수중음향채널의 대역에 따른 BFSK/BPSK 전송 성능

박지현* · 윤종락** · 박규칠**

Underwater Acoustic Channel Bandwidth and its Effects on BFSK/BPSK Performance

Ji-hyun Park* · Jong-Rak Yoon** · Kyu-Chil Park**

이 논문은 2001학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의해 연구되었음.

요 약

본 논문에서는 다중경로 복반사 환경의 수중음향채널 대역이 BFSK(Binary Frequency Shift Keying)와 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 방식의 비트 오류율에 미치는 영향을 해석하였다. 이산적인 복반사와 연속적인 복반사가 공존하는 다중경로 환경으로 수중음향채널을 모델화 하였고, 모의 실험으로 채널 특성에 따른 비트 오류율 특성과 대역을 결정하는 다중경로 지연 확산 정수의 기준을 제시하였다. 채널 대역폭이 100Hz인 수조실험에서 전송율이 100bps이하로 제한되어 모의실험에서 제시한 전송성과 일치하였다.

ABSTRACT

In this paper, the multipath effect on underwater acoustic channel bandwidth and BFSK and BPSK bit error dependency on channel bandwidth are analyzed. The multipath is modeled as a discrete multipath and a continuous multipath and the channel bandwidth is expressed as a function of multipath delay spread constant. Bit error characteristics on the channel bandwidth and the criteria of the multipath delay spread constant are found through the numerical simulation. The transmission bit rate of less than 100bps in the water tank which has a channel bandwidth of 100Hz, is a consistent result with the numerical simulation.

키워드

수중통신채널, BFSK, BPSK, 수중음향채널 대역폭, 수중음향통신

1. 서 론

무인 수중 잠수정이나 수중환경감시용 측정장비들은 모선에서 제어가 이루어지는 것으로 자신의 위치 및 운동제어신호나 측정자료 전송등은 모선과의 수중음향통신에 의해 이루어지며 화상자료 등은 저 전력 고속전송이 요구된다. 수중 이동체의

항법이나 수중로봇과 잠수정 등의 운동제어신호의 전송율은 1kbps이하이며 높은 신뢰도가 요구되는 반면 수중센서에 의해 수집되는 자료를 수상으로 전송하는 정보신호의 전송율은 수십 kbps의 높은 전송율이 요구되며, 제어신호전송보다 상대적으로 높은 10⁻³~10⁻⁴의 오류율을 요구한다[1,2].

초기의 수중통신시스템은 전송율이 낮은 제어신

*부경대학교 정보통신공학과

**부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부

호전송에 사용되어 ASK 혹은 FSK 시스템으로 복 반사에 의한 Intersymbol Interference(ISI)를 제어 하였다. 그러나 최근에는 고속전송방식의 MFSK (Multiple Frequency Shift Keying), MPSK (M-ary Phase Shift Keying), DPSK(Differential Phase Shift Keying) 및 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)등의 다양한 변조방식이 적용되고 있으며, 오류율을 낮추기 위해 적응 빔포밍기술, 적응 등화 기법 및 시역전신호처리(Time Reversal Signal Processing)기술 등이 연구되고 있다[3-5]. 이와 더불어 미국의 Northeastern 대학의 수중 영상자료 전송을 위한 웨이브렛 기반 압축알고리즘 개발과 기타 대역확산기법(Spread Spectrum)을 이용한 수중정보통신의 보안에 관한 연구 등 민간 연구기관 주도의 많은 연구 활동이 있다.

이러한 수중음향통신기술은 해양이라는 특수한 수중환경에서 전파보다 상대적으로 전송손실이 적은 음향을 정보 전달매체로 사용하므로 이에 따른 고유의 통신기술이 요구된다.

전송시스템의 구성에 영향을 미치는 음향채널 변수로는 확산 및 흡수손실, 다중경로에 의한 복반사, 배경잡음 및 송수신기의 상대운동에 의한 도플러확산 등이 있다[6]. 확산 및 흡수손실은 통신거리를 결정하며 주파수에 따라 달라지는 흡수손실과 배경잡음은 유효대역폭을 결정하는 일차요인이다. 이들 중 수중음향통신의 가장 큰 방해요인인 복반사는 해면, 해저면 혹은 수중부유생물을 포함한 반사체에 기인되며, 이들의 시공간적인 불균질성에 의한 주파수 및 시간영역에서의 신호 확산은 신호의 코히어런스(Coherence)를 저하시킨다. 따라서 수중음향통신시스템을 결정하는 송신신호의 설계나 수신신호 처리를 위해서는 복반사에 대한 시공간적 변화특성과 전송능력이 해석되어야 한다[1,2].

본 논문에서는 고속수중전송시스템의 설계 단계에서 요구되는 복반사에 의한 채널의 대역특성을 해석하였고, BPSK(Binary Phase Shift Keying)와 FSK(Frequency Shift Keying) 방식을 적용하여 채널의 대역특성이 이들 방식의 오류율에 미치는 영향을 해석하였다. 모의실험과 수조실험으로 해석 결과를 검증하였다.

II. 복반사에 의한 수중음향채널의 대역특성

해면과 해저로 경계 지어져 있는 해양에서 점 음원에서 방사되는 음파는 다중경로를 통해 수신기에 수신된다. 아울러 해면의 교란, 수중부유생물

체에 의한 산란파가 혼입된다.

따라서 수신기에 수신되는 음파는 수신기가 상대적으로 송신기에 가까이 있는 경우에는 직접파와 이산적인 다중경로파가 일차적으로 우세하게 수신되고, 수신기의 위치가 멀리 있는 경우에는 연속적인 잔향파의 성분도 우세하게 혼입된다. 아울러 이러한 특성은 송신기의 움직임, 해양환경의 시변특성 등에 의해 시간적으로 변화한다. 따라서 다중경로와 산란에 의한 수신신호의 특성을 확률모델로 해석한 많은 연구가 있다.

반송주파수로 변조되어 수중음향채널로 출력되는 송신신호는 $s(t)$ 는 식(1)과 같이 주어진다[7].

$$s(t) = \text{Re} [s_i(t) e^{j2\pi f_c t}] \quad (1)$$

여기에서, $s_i(t)$ 는 송신신호의 등가 저역 신호로 이진 데이터의 기저대역신호이다. 따라서 수신신호 $r(t)$ 는 채널의 임펄스 응답에 의해 식(2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \text{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) s(t-\tau) d\tau \right] \\ &= \text{Re} \left(\left[\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) s_i(t-\tau) e^{-j2\pi f_c \tau} d\tau \right] e^{j2\pi f_c t} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

채널의 배경잡음을 무시하면 이산적인 복반사와 연속적인 복반사에 의해 채널의 임펄스 응답 $h(t)$ 는 식(3)과 같이 표현된다.

$$h(t) = \sum_{n=0}^N \alpha_n \delta(t - \tau_n) + R(t) e^{-kt} \quad (3)$$

식(3)의 첫째항은 직접파를 포함한 이산적인 복 반사이며, α_n 는 n 차 다중경로신호의 진폭으로 경계 면에서의 반사손실, 경로손실 및 흡수손실에 의해 결정되며 τ_n 은 n 차 다중경로 지연시간이다. 두 번째 항은 연속적인 복반사를 나타내며, 초기 이산 복반사에 비해 일정시간 지연후에 도달하며 $R(t)$ 는 랜덤진폭 및 위상을 갖고 k 는 잔향시간을 결정하는 감쇠상수이다. 식(3)에 의해 식(2)는 식(4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \text{Re} \left(\left[\sum_{n=0}^N \alpha_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} s_i(t - \tau_n) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \int_{t_0}^{\infty} R(t) s_i(t-\tau) e^{-k\tau} e^{-j2\pi f_c \tau} d\tau \right] e^{j2\pi f_c t} \right) \\ &= \text{Re} (h_i(t) * s_i(t) e^{j2\pi f_c t}) \quad (4) \end{aligned}$$

여기서, $h_i(t) = \sum_{n=0}^N \alpha_n e^{-2\pi f_c \tau_n} \delta(t - \tau_n) + R(t) e^{-kt} e^{-2\pi f_c t}$ 는 다중경로에 의한 채널의 등가 저역 통과 임펄스 응답이다. 식에서 보는 바와 등가 저역 통과 임펄스 응답은 다중경로의 진폭, 다중경로 지연시간 및 연속적인 복반사의 잔향시간의 함수이다. 등가 저역 신호 $s_i(t)$ 가 왜곡 없이 전송되기 위해서는 등가 저역 통과 임펄스 응답 $h_i(t)$ 의 대역이 $s_i(t)$ 의 대역보다 커야하고 대역 내에서 선형위상특성이어야 한다.

식(3)의 자기 상관함수 $R(\tau)$ 는 복반사의 지연시간에 따른 출력 스펙트럼으로 연속적인 복반사만의 경우 전형적인 특성은 그림1(a)와 같고 전력스펙트럼 $S(f)$ 는 그림1(b)와 같다[7,8].

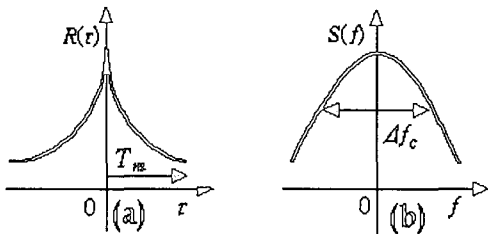


그림 1. (a) 복반사의 지연시간에 따른 출력 스펙트럼. (b) 채널의 파워스펙트럼.

Fig. 1. (a) Multipath delay power spectrum. (b) Power spectrum density of channel.

그림1(a)에서 T_m 은 다중경로 지연확산 정수 (Multipath delay spread constant)로 정의되며, 그림1(b)의 Δf_c 는 다중경로채널의 코히어런스 대역폭(Coherence bandwidth of the channel)로 정의되며,본 논문에서는 채널 대역폭으로 정의한다. Δf_c 와 T_m 의 관계는 식(5)와 같다.

$$\Delta f_c \approx \frac{1}{T_m} \tag{5}$$

여기서, 등가 저역 신호대역폭 W 가 식(5)로 주어지는 채널대역폭 Δf_c 보다 크게 되면 대역폭내의 성분주파수들의 진폭 및 위상은 비선형적으로 영향을 받게 되어 신호는 왜곡된다. 따라서 오류 없이 디지털 데이터를 전송하기 위해서는 신호대역폭 W 는 Δf_c 보다 적어야한다[3,7].

표1은 연속 복반사의 경우, T_m 값의 설정에 따

른 채널 대역폭 Δf_c 로 표에서 T_{m3} , T_{m6} 등은 복반사 출력 스펙트럼이 초기치보다 각각 3dB 및 6dB 감소되는 시간을 기준으로 한 T_m 값이다. III 장에서는 복반사 환경에서의 BFSK와 BPSK의 전송특성을 보이고 아울러 채널 대역특성을 나타내는 T_m 의 기준을 제시한다.

표 1. 잔향시간 및 다중경로 지연확산 정수에 따른 채널의 코히어런스 대역폭.

Tab.1. Channel coherence bandwidth with respect to reverberation time and multipath delay spread constant T_m .

잔향시간(T_{60})	$T_{m3}/\Delta f_c$	$T_{m6}/\Delta f_c$	$T_{m10}/\Delta f_c$
0.02 sec	0.001/1000	0.002/500	0.003/333
0.04 sec	0.002/500	0.004/250	0.007/144
0.08 sec	0.004/250	0.008/125	0.013/72
0.16 sec	0.008/125	0.016/63	0.027/36

III. 복반사 수중음향채널 환경에서의 BFSK와 BPSK 전송 특성

BFSK 및 BPSK의 $s_i(t)$ 는 식(6)으로 주어진다.

$$s_i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} D_k p(t - kT) \tag{6}$$

여기서, $P(t)$ 는 단위 진폭을 갖고 지속시간이 T 인 구형파이고, D_k 는 2진 데이터의 시계열 신호의 복소 표현으로 BFSK와 BPSK에 대해서는 식(7)로 주어진다.

$$D_k = \begin{pmatrix} e^{j2\pi m \Delta f} & : \text{BFSK} \\ e^{j2\pi m/2} & : \text{BPSK} \end{pmatrix}, \quad m = 0, 1 \tag{7}$$

따라서 식(3)에 의해 수신신호는 식(8)로 주어진다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \text{Re} \left[\left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^N \alpha_n e^{-2\pi f_c \tau_n} D_k p(t - kT) \right) e^{j2\pi f_c t} \right] \\ &+ \text{Re} \left[\left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) D_k p(t - kT) e^{-k\tau} e^{-2\pi f_c \tau} d\tau \right) e^{j2\pi f_c t} \right] \\ &= \text{Re} \left[\left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_0 D_k p(t - kT) \right) e^{j2\pi f_c t} \right] \tag{8} \\ &+ \text{Re} \left[\left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{-2\pi f_c \tau_n} D_k p(t - kT) \right) e^{j2\pi f_c t} \right] \end{aligned}$$

$$+ Re\left(\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(t) D_k(t-kT) e^{-kt} e^{-Rk f, t} dt\right] e^{Rk f, t}\right)$$

식(8)의 1항은 직접파 성분이고, 2항과 3항은 이산 및 연속 복반사 성분으로 ISI를 야기하는 성분이다.

해양환경이 시간적으로 크게 변화하지 않아 다중경로의 경로길이 혹은 경로상의 흡수손실들이 크게 변화하지 않는다면 진폭 α_n 은 일정하다고 할 수 있다. 그러나 반송주파수가 큰 경우 τ_n 의 미소 변화에 의해서도 위상은 크게 변화하게 되어 다중 경로에 의한 전체신호의 크기는 보상간섭 혹은 역 위상간섭에 의해 큰 변화율로 변화하게 된다.

천해에서의 디지털 수중음향 통신의 성능을 이산 복반사 모델로 해석한 연구가 있으나[9,10], 본 연구에서는 연속 복반사 통신채널을 가정하여 TDL (Tapped Delay Line)로 모의하였다[11]. 수신 신호의 복조는 식(9)로 주어지는 상관기 출력 c_{fp} 로 해석하였다.

$$c_{fp} = \int_t^{t+T_b} r(t) d_{fp} dt \quad (9)$$

여기서, d_{fp} 는 송신신호이다. 그림2와 그림3은 각각 잔향시간이 0.04초와 0.16초인 경우의 전송율에 따른 BFSK 및 BPSK의 비트오류 특성이다.

그림2에서 전송율이 500bps인 경우에는 오류가 없으나 2000bps인 경우는 BFSK와 BPSK의 비트 오류율은 각각 약 0.040 및 0.035이었다.

그림3에서 전송율이 125bps인 경우에는 오류가 없으나 500bps인 경우는 BFSK와 BPSK의 오류율은 각각 약 0.033 및 0.025이었다.

또한 그림2와 그림3에서 전송율이 증가하면 출력의 평균값이 작아지고, 분산은 크게 되어 다중경로에 의한 ISI가 크게 된다. BPSK의 경우에는 BFSK에 비해 분산이 크게 되어 배경잡음에 보다 취약하다고 판단된다.

표1의 다중경로 지연확산 정수 T_m 에 대한 채널 대역폭과 그림2와 그림3의 오류가 없는 경우의 신호대역폭(전송율)과 비교하면 연속 복반사의 지연확산정수는 표1의 T_{m3} , 즉 초기치에 비해 3dB 낮은 값으로 정의할 수 있다.

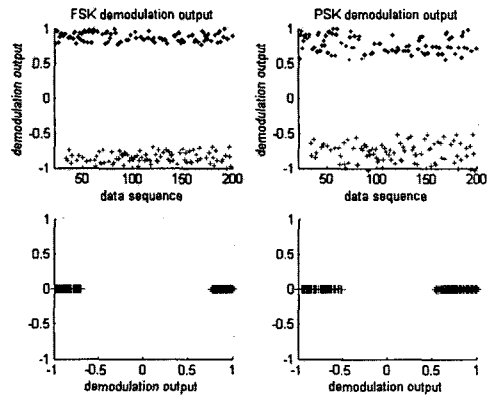


그림 2.(a) Fig. 2(a)

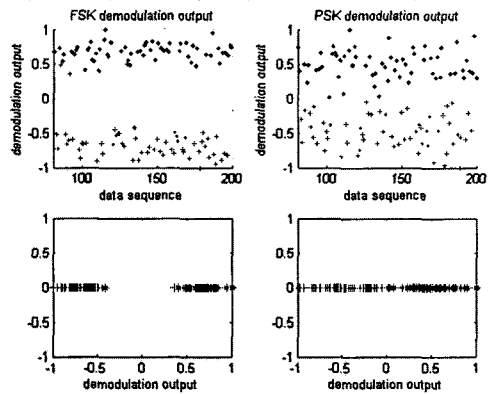


그림 2.(b) Fig 2.(b)

그림 2. 잔향시간 0.04초에 대한 비트 오류 특성.

- (a) 전송율 500bps 경우의 비트오류 특성.
- (b) 전송율 2000bps 경우의 비트오류 특성.

Fig.2. Bit error characteristics of T60 of 0.04 sec.

- (a) Bit error characteristics of 500bps.
- (b) Bit error characteristics of 2000bps.

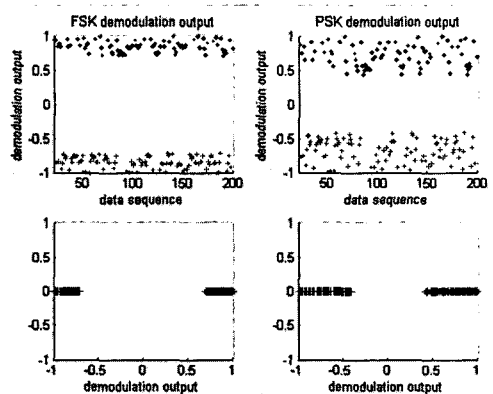


그림 3.(a) Fig. 3 (a)

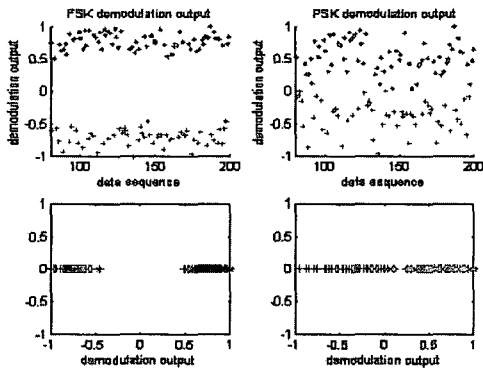


그림 3.(b) Fig 3.(b)
 그림 3. 잔향시간 0.16초에 대한 비트 오류 특성.
 (a) 전송율 125bps 경우의 비트오류 특성.
 (b) 전송율 500bps 경우의 비트오류 특성.
 Fig. 3. Bit error characteristics of T60 of 0.16 sec.
 (a) Bit error characteristics of 125bps.
 (b) Bit error characteristics of 500bps.

IV. BFSK와 BPSK 시스템 구성 및 수조실험

그림4는 FSK 시스템 구성도로 XR2206 칩의 VCO에 연결된 콘덴서와 저항에 의해 Mark 주파수와 Space 주파수가 결정되며, TL072 OP AMP를 통해 증폭되어 출력된다. FSK복조기는 XR2211내부에 연결된 VCO와 외부의 콘덴서와 저항으로 동기신호를 발생시킨다. 동기된 신호는 루프필터를 통과하여 잡음이 제거되며 데이터 필터를 통과한 후 LM339비교기를 통해 출력되게 된다[12,13].

그림5는 BPSK 시스템 구성도로 MPY634KP Multiplier칩을 통해 이진 입력신호는 변조되며, TL072 Op Amp를 통해 출력되게 된다. 출력된 변조신호는 수조의 수중음향채널을 통해 수신 청음기로 수신된다. BPSK 복조부는 MC1496 칩을 이용하였고, 출력신호는 비교기 LM339 통해 임계값 이상일 경우 1, 임계값 이하일 경우 0으로 출력된다 [12,13].

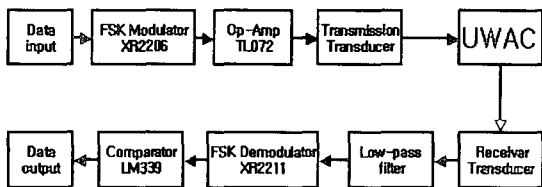


그림 4. FSK 시스템 구성.
 Fig. 4. FSK system configuration.

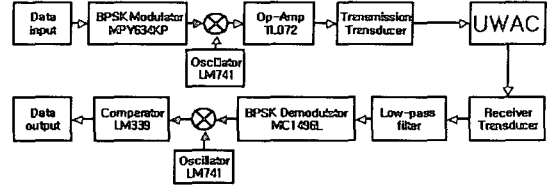


그림 5. BPSK 시스템 구성.
 Fig. 5. BPSK system configuration.

수중통신 채널의 대역특성에 따른 BPSK와 BFSK 시스템의 성능을 평가하기 위한 수조는(2mx 1.5mx1m)크기이며 그림6은 실험 구성도이다. 채널의 주파수 확산을 무시하기 위해 수조면의 상태는 실험시 정적인 상태로 유지하여 시불변 특성을 갖도록 하였고 주위환경을 정속상태로 유지하여 배경잡음이 무시되는 환경으로 하였다.

그림7은 수조의 임펄스 응답특성으로 송수신기 간의 수평거리는 1.0m, 각각의 수심은 0.35m이다. 그림 7로부터 수조의 다중경로 지연확산 정수 T_{m3} 는 약 0.01 초로 대응되는 채널 대역폭은 약 100Hz이고 따라서 100bps 이하는 오류 없이 전송 가능함을 알 수 있다.

그림8은 비트오류 실험 결과이다. 지연확산정수에 의해 예측되는 바와 같이 약 100bps 이하에서는 일반적으로 전파통신환경에서 통신이 가능한 오류율인 약 10^{-4} 을 보이며 이는 모의실험에서 보이는 특성과 일치한다. 그 이상의 전송율에서는 오류율이 급격히 증가함을 보인다.

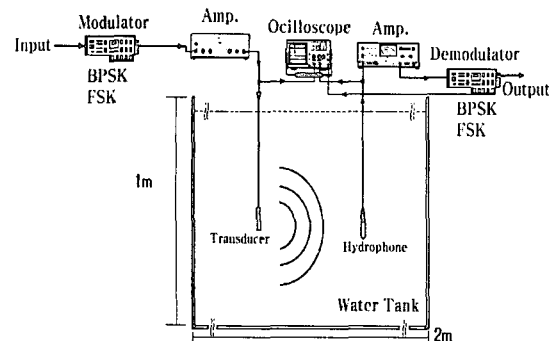


그림 6. 수조실험 구성도.
 Fig. 6. Water tank experiment configuration.

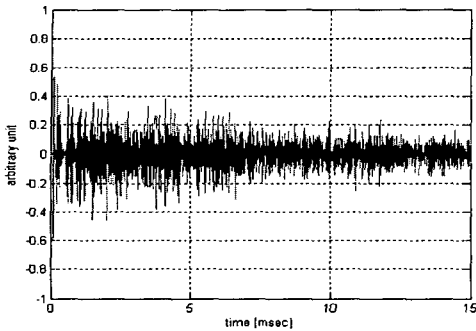


그림 7. 수조의 임펄스 응답
Fig. 7. Impulse response of the water-tank.

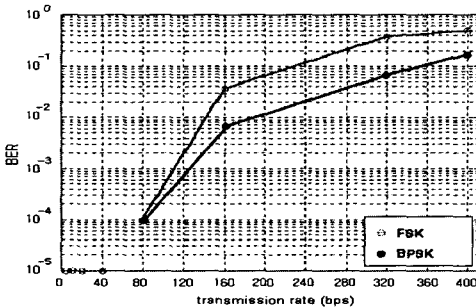


그림 8. 전송율에 따른 비트오류율 특성.
Fig. 8. BER characteristic with respect to transmission bit rate.

V. 결 론

본 연구에서는 다중경로 복반사환경의 수중음향 채널의 대역특성을 해석하고 대역특성이 BFSK (Binary Frequency Shift Keying)와 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 방식의 전송 특성에 미치는 영향을 해석하였다. 이산적인 복반사와 연속적인 복반사가 공존하는 다중경로 환경으로 수중음향채널을 모델화 하였고, 연속적인 복반사의 잔향시간에 대한 채널 대역 특성 및 전송특성을 해석하였으며 BPSK와 BFSK의 비트 오류율을 해석하였다.

채널대역을 결정하는 지연확산 정수는 연속 복반사의 초기치에 비해 3dB 감소하는 시간으로 정의 될 수 있음을 밝혔다. 자체 제작한 BFSK와 BPSK 시스템으로 수행한 수조실험에서 수조의 채널 대역폭은 100Hz로 측정되었고 BPSK와 BFSK 전송율은 100bps이하로 제한되어 모의실험으로 구한 결과와 일치하였다.

이상의 결과는 다중경로 영향이 상대적으로 우세한 수심이 얇은 천해 환경에서 데이터 전송성능이 우수한 시스템 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있고, 채널 대역폭이 제한되는 환경에서 적응 필터 등을 적용하는 고속 데이터 전송시스템을 개발하기 위한 모의환경으로 응용될 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Milica Stojanovic, "Recent Advance in High Speed Underwater Acoustic Communications," IEEE Journal of Oceanic engineering, Vol. 21, No. 2, pp.125-136, 1996.
- [2] Robert S. H. Stepanian, Milica Stojanovic, "Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication Systems", Kluwer Academic Publishers , 2002.
- [3] Arthur B. Baggeroer, "Acoustic Telemetry -Overview," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. OE-9, No 4, October 1984.
- [4] D. Billon and B. Quellec, "Performance of High Data Rate Acoustic Underwater Communication Systems Using Adaptive Beamforming and Equalizing," Proc. IEEE OCEANS 94', pp.507~512, 1994
- [5] David Porta, "Underwater Acoustic Communications," Sea Technology, pp.49-55, February 1998.
- [6] Robert J. Urick, "Principles of Underwater Sound," 3rd edition, McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [7] John G. Proakis, Digital Communications, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, 2000.
- [8] C. A. Gray, G. T. Uehara, and S. Lin, "Bandwidth Efficient Modulation for Underwater Acoustic Data Communications," Proc. IEEE OCEANS 94', pp.281~285, 1994.
- [9] 임용곤, 박종원, 초영철, "Multipath를 고려한 수중영상 전송 시스템 설계," 한국해양정보통신학회 논문지 제5권 제1호, 2001.
- [10] Adam Zielinski, Young-Hoon Yoon, and Lixue Wu, "Performance Analysis of Digital Acoustic Communication in a Shallow Water Channel," IEEE Journal of

Oceanic Engineering, Vol. 20, No 4, October 1995.

- [11] James W. Modestino and Kurt R. Matis, "Interactive Simulation of Digital Communication Systems," IEEE Journal on Selected Areas in Comm., Vol. SAC-2, No.1, Jan. 1984, pp. 51-76.
- [12] 손근영, "무선 수중 데이터 통신 환경분석과 FSK 변복조 시스템 설계", 부경대학교 정보통신공학과 석사학위논문, 2000.
- [13] 박지현, "수중 데이터통신시스템 설계를 위한 수중 음향채널 특성해석", 부경대학교 정보통신공학과 석사학위논문, 2002.

저자소개



박지현(Ji-Hyun Park)

2000년2월 : 밀양대학교 정보통신공학과(공학사)
 2002년2월 : 부경대학교 정보통신공학과(공학석사)
 2003년~현재 : 부경대학교 정보통신공학과 박사과정

※관심분야 : 디지털신호처리, 수중통신시스템, 수중음향



윤종락(Jong-Rak Yoon)

1977년2월 : 부경대학교 어업학과(수산학사)
 1980년2월 : 부경대학교 수산물리학과(수산학석사)
 1979년~1985년 : 국방과학연구소 수중음향 연구실 연구원
 1987년:플로리다 어틀랜틱 대학교 해양공학과(공학석사)
 1990년:플로리다 어틀랜틱대학교 해양공학과(공학박사)
 2004년 현재:부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 교수
 ※관심분야 : 음향신호처리, 수중통신 시스템설계, 수중음향



박규칠(Kyu-Chil Park)

1993년 2월 : 부산수산대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1995년 2월 : 부산수산대학교 전자공학과졸업(공학석사)
 2000년 3월 : 일본 오카야마대학 자연과학연구과 졸업(공학박사)
 2000년 3월~2002년 2월 : 일본 아키타현립대학 시스템과학기술학부 연구원
 2002년 3월~현재 : 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 전임강사로 재직중
 ※관심분야 : 음향신호처리, 수치해석, 최적화 및 역문제