

수중 데이터 통신 시스템 개발 - 변조방식의 성능 분석

손근영, 노용주, 윤종락
부경대학교 정보통신공학과

Underwater Data Communication System - Performance Analysis of Digital Modulations

Son Geun-young , Ro Yong-ju , Yoon Jong-rak
Pukyong National University, Dept of Telematics Engineering
E- mail : jryoon@pknu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 변조방식에 따른 수중 데이터 통신의 성능을 수치모의 실험을 통해 비교·분석하였다. 수중 통신 환경에서 다중경로의 영향을 고려하여 수치모의 실험을 수행하였고 데이터 변조 방식에 따른 성능을 평가하였다.

1. 서 론

우리 나라의 수중 통신 시스템의 개발은 아직 미미한 편이다. 단지 군사적 목적이나 자원탐사 분야에서 제한적으로 개발·사용되어 왔다. 그러나 최근 바다에 대한 관심이 고조되고 그 활용 분야가 확대되고 있는 시점에서 수중통신 시스템 개발이 요구되어 지고 있다. 현재 유선통신에서는 많은 연구가 진행되어 광섬유를 이용한 고속 통신이 이루어지고 있고, 아직 연구 중에 있다. 그러나 무선통신에 있어 통신 시스템 개발은 아직 미미한 단계이며, 해양이라는 특수한 통신 환경 때문에 개발이 더딘 편이다.

대기중의 전파통신은 현재 많은 연구가 진행되어 통화 품질은 물론 가격면에서도 우수한 시스템이 개발되어 있다. 전파통신에서 사용되는 통신시스템을 수중환경에 적용하는 어렵다. 물에서 전파는 급격한 감쇠 특성을 갖기 때문에 수중 무선 통신에 부적합하다. 그러나 해양 즉 물에서는 음파를 이용한 통신이 가능하지만 해양 매질은 통신을 하기에는 아주 까다로운 매질이다. 좋은 통신을 위해서는 대역폭이 크고 채널이 투명해야

하는데 반해, 음파는 고주파 손실이 커서 사용 대역폭이 좁고, 배경잡음의 영향도 많이 받는다. 특히 다중경로에 의한 영향은 가장 심각한 문제로 여겨지고 있다. 이런 환경적 영향을 극복하기 위해서는 수중 환경 특성을 분석해야만 한다. 수중 무선 통신에서는 이런 까다로운 환경을 극복하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. 현재 이런 다중경로의 극복 방법으로 적용 빔포밍 기법과 적응 등화기를 사용한 방법들이 있다. [1]

이런 무선통신 시스템은 과거에는 아날로그 변조방식을 채택한 음성통신 분야에서 제한적으로 개발되어 왔으나, 현재에는 디지털 하드웨어 기술의 발전으로 디지털 변조방식을 채택한 데이터 통신 시스템을 개발하고 있다. 본 논문에서는 무선 수중 데이터 통신 시스템에서 가장 많이 쓰이는 FSK, PSK, DPSK 변조방식의 다중경로의 영향에 대해 수치 모의 실험을 통해 그 성능을 비교·분석하였다. [2]

2. 수중 음향 전송채널

해양에서 음파의 전송특성은 거리에 따른 음파에너지의 손실(Transmission Loss), 주위배경잡음(Ambient Noise), 다중경로에 의한 잔향(Reverberation) 및 송수신기나 매질의 상대운동에 의한 도플러효과(Doppler Effect)로 대별된다. 이들의 특성은 해양의 시공간적 변화에 의해 특성을 달리하므로 수중 데이터 통신시스템을 설계하는 단계에서는 이들의 특성을 엄밀히 해석할 필요가 있을 것이다.

손실에는 경로손실과 흡수손실이 있고 March등에

의하면 수심 40m, 등음속 구조인 천해에서 약 5km 이내의 거리에서 총 경로손실 TL은 식(1)로 주어진다.

$$TL = 20 \log r + \alpha r \quad (1)$$

여기서, α 는 주파수에 따른 kyd 당 흡수 손실이다. 손실은 수중 데이터 통신 시스템에서 사용주파수, 최대통신거리 및 다음에 소개하는 배경잡음 특성과 함께 음원 준위를 결정하는 중요한 파라미터로 고려된다.

다음으로 수중음향 통신에서 가장 극복하기 어려운 환경은 다중경로에 의한 영향이다. 해면이나 해저의 경계면에 의한 반사나 방해물에 의한 반사는 송·수신기 사이에 많은 다중경로는 만든다. 특히 불완전한 경계면은 더욱 다중경로의 영향에 대한 문제를 복잡하게 만든다. 해면의 반사식은 해면의 반사손실을 정확히 정의하기는 어렵지만 3dB이하인 경우에 식(2)로 주어진다. 이것은 주파수, 파고 및 입사각에 따라 달라지는 특성을 보인다.

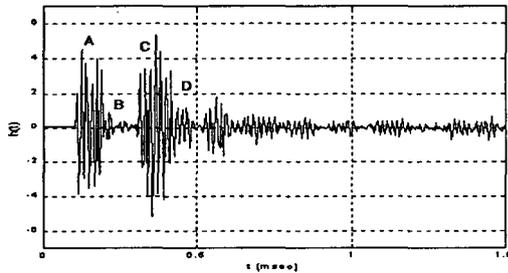
$$\alpha_s = 10 \log_{10} [1 - 0.0234 (fH)^{3/2}] \quad (2)$$

f : 신호 주파수 [kHz], H : 평균 파고 [ft]
바닥의 반사 손실은 식 (3)과 같다.

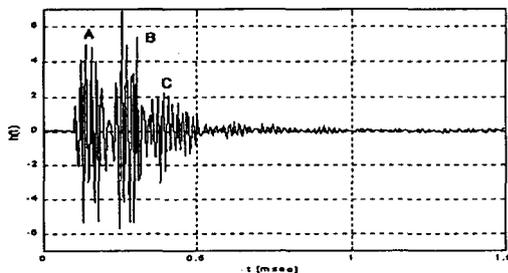
$$\alpha_b = -20 \log_{10} R_b \quad (3)$$

$$R_b = \frac{(Z_2/Z_1) \sin \theta_i - \sin \theta_t}{(Z_2/Z_1) \sin \theta_i + \sin \theta_t}$$

여기서, R은 해저반사계수, Z_1/Z_2 은 바닥상태물질과 물의 특성임피던스 비, θ_i 는 입사각, θ_t 는 투과각이다.[3]



(a) at the harbor



(b) at the sea

그림 1 30kHz tone burst 신호의 응답특성

그림 1은 남해 근해에서 측정된 tone burst 신호에

대한 다중경로 응답 특성이다. 다중경로에 의해 생기는 반사파는 직접파와 비슷한 크기로 나타나고 있다. 이러한 다중경로는 수중음성통신 시스템에서는 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있지만 수중 데이터 통신에서는 수신신호의 왜곡을 야기하여 통신에 지대한 영향을 미치게 된다. 다중경로 영향의 왜곡은 송수신기가 수평방향으로 위치한 경우가 수직방향으로 위치한 경우보다 반사파의 영향이 심화되어 왜곡현상이 심하게 된다.

이러한 다중경로의 영향은 적절한 통신방식의 선택을 강요하게 되어 시스템의 설계를 어렵게 한다. 다중경로 영향을 적게 받게 하기 위해 송·수신기의 지향성을 높게 되면 다중경로의 효과를 제거할 수도 있으나 "Pointing error" 문제가 있어 이동성을 갖는 통신 시스템에서는 송·수신기는 가능한 무지향성이 요구된다. 이러한 이동성을 갖는 시스템은 도플러효과 고려해야 하는 문제가 있다.

도플러 효과는 송수신기의 이동뿐만 아니라 해면의 상하 교란 운동에 의해서도 발생하며 전송주파수를 중심으로 교란운동의 스펙트럼이 양측파대로 관측된다. 이러한 특성은 전송주파수가 고주파수인 경우 시스템의 성능을 좌우할 정도로 심각한 문제로 알려져 있다.

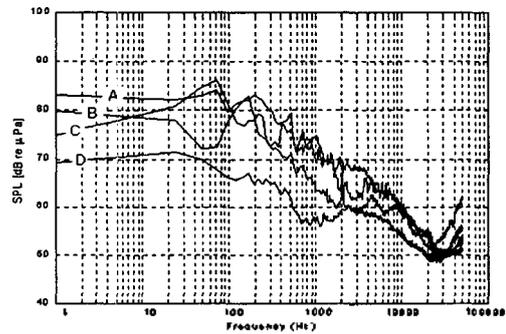


그림 2 남해 근해 측정 배경잡음

해양의 배경잡음은 다양한 요인에 의해 결정되는데, 심해에서는 통행 선박과 해상 상태에 의해 배경잡음 크기가 결정되고 천해에서는 이들 요인 외에 육상의 산업 시설에 의한 수중 전파음과 천해의 다양한 해양생물에 의한 소음에 의해서 배경잡음 크기가 결정된다. 그림 2는 남해 근해에서의 측정된 배경잡음 특성으로 주파수에 반비례하는 특성을 보인다.

3. 통신방식

전자파 통신 환경에서 적용되는 변조 방식은 수중 음향 환경에도 그대로 적용 될 수 있다. 그러나 앞서

언급한 바와 같이 전송채널의 특성을 좌우하는 손실, 배경잡음, 다중경로 효과나 도플러 효과는 해양의 수심, 해상 상태 및 사용주파수에 좌우된다. 이런 환경적 영향을 고려하여 통신방식을 선택해야 함은 물론이고, 정보원의 정보량에 대한 것도 고려되어야 한다. 고화질의 해저 영상을 보내기 위해서는 10 ~ 100kbps의 정도의 전송속도, 제어신호나 문자를 보내는 데이터 통신에서는 1kbps~4kbps의 전송속도가 요구되고 있다.

데이터 통신 시스템에서 사용되는 일반적인 변조방식으로 FSK, BPSK, DPSK등이 있다. FSK 변조방식은 비트 준위에 따라 서로 다른 반송 주파수를 갖는 변조방식이다. FSK 복조기에서 인코히어런트 검파는 반송파의 주파수와 위상에 대한 정확한 정보를 필요로 하지 않아 간단한 복조단을 구현할 수 있다. 코히어런트 검파의 경우는 정합필터를 이용한 복조기가 사용된다.

BPSK 변조방식은 비트 준위에 따라 반송파의 위상차가 180°를 갖도록 하는 경우이다. BPSK의 복조방식은 위상 정보가 항상 필요하므로 동기 검파를 이용하여 복조하게 된다. BPSK 방식은 FSK에 비해 대역폭도 절반이고 수신기에서 반송파 재생 작업도 상대적으로 용이하나 피변조 신호의 위상을 상대적으로 판단하므로 피변조 신호를 완전히 반대로 판단할 위험성이 있다.

DPSK 변조방식은 BPSK 변조방식의 변형으로 연속된 두 비트간의 차이에 대한 정보를 부호화 하여 변조한 방식이다. 이 방식은 복조단에서 반송파를 재생시킬 필요가 없고 초기 위상동기를 요구하지 않아 BPSK 복조 방식보다 복조단 구성이 쉽다. 그러나 비트의 판정 오류가 쌓여오므로 일어날 수 있다는 결점이 있다. [4]

시스템 구현에 있어서 비용과 복잡도 뿐만이 아니라, 다른 시스템에 대해 한 가지 형태의 디지털 데이터 시스템을 선택하는 때는 여러 가지의 고려 사항들이 있다. 다중경로를 고려해야하는 해양 환경에서 수신기의 위상동기 기준을 설정하는 것이 어려우므로 위상비동기 시스템을 사용해야 하는 것이 요구되고 복잡한 해양 통신 환경에 따라서 적합한 변·복조방식을 선택해야 한다.

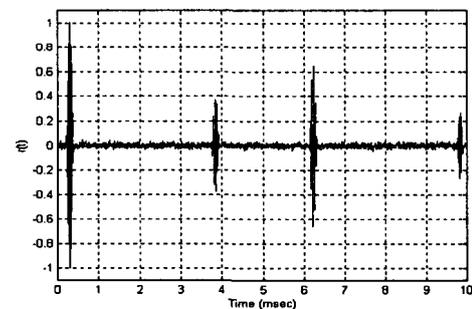
일반적인 통신 방식에 따른 신호대 잡음비는 PSK방식이 가장 좋고, FSK방식이 다소 나쁜 특성을 나타낸다. 해양 배경잡음의 크기가 예측될 수 있다면 적정의 신호대잡음비를 갖도록 각 변조방식을 설계할 수 있을 것이다. 그러나 2장에서 언급한 바와 같이 해저와 해면으로 경계지어져 있는 해양환경에서 가장 중요한 문제는 다중경로의 효과가 통신 시스템 설계에 가장 중요한 영향을 미칠 것이다. 따라서 본 연구에서는 다중경로에 대한 각 변조 방식의 성능을 수치 모의 실험으로 검증하였다.

4. 수치 모의 실험 및 결과

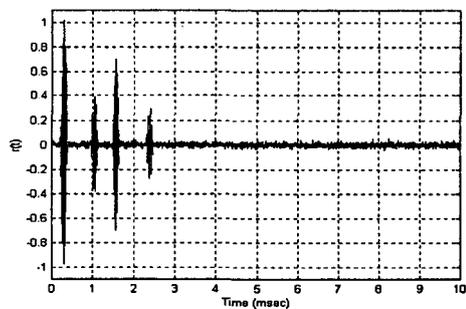
수신기에 수신되는 음파는 직접파는 물론 해면·해저 반사파로 구성된다. 이러한 수중통신채널은 일반적으로 수직적 채널과 수평적 채널로 나눌 수 있다. 즉 해양의 수심에 대한 송신기와 수신기간의 수평거리 비 (R/h , R:송수신간의 거리, h:수심)가 크면 수평적 채널, 작으면 수직적 채널로 분류되는 것으로 알려져 있다. 수직적 채널은 직접파와 반사파와의 경로차가 커서 다중경로의 영향이 상대적으로 작은 데 비해 수평적 채널은 해면·해저의 다중경로 영향이 크다. [5][6]

수치 모의 실험에서는 음파전달 경로로 해면, 해저, 해면-해저, 해저-해면의 4가지 다중경로만을 고려하였다. 수심(h)은 100m, 송신기의 깊이는 해면에서 5m, 수신기의 깊이는 해면에서 97m로 두었다.

송신기와 수신기간의 수평거리(r)는 수직 채널상태를 50m로 수평 채널은 500m인 경우로 수치 모의 실험을 수행하였다. 음속은 깊이에 따라 일정하게 두고, 경로 손실은 식(1)을 사용하였으나, 주파수에 따른 흡수 손실은 고려하지 않았다. 해면의 반사손실은 식(2)에서 평균 파도가 0.3ft인 파도가 잔잔한 상태의 경우로 두었다. 해저의 반사손실은 해저 바닥을 모래로 가정하여 적용하였다. 신호대잡음비가 40dB로 하여 배경잡음이 거의 없는 조건으로 하였다.



(a) 거리 50m인 경우



(b) 거리 500m 인 경우

그림 3 tone burst 신호의 다중경로 응답

5. 결론

그림 3는 송신기와 수신기간의 수평거리가 50m, 500m인 경우 0.2ms의 지속시간을 갖는 톤 버스트 신호에 대한 수신신호 특성이다. 수신신호는 직접파가 들어오고, 반사파는 해저, 해면, 해면-해저, 해저-해면 반사파 순으로 응답된다. 수직채널($r=50m$)은 경로차가 3.54msec로 크게 나타나는 반면에 수평채널($r=500$)은 경로차가 0.75msec가 이고 경로차가 수직 채널의 경우보다 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서 수직채널이 반사파의 영향 없이 더 많은 데이터를 보낼 수 있다.

수치모의실험에서 다중경로의 영향을 고려하기 위하여 수직 채널과 수평채널 각각의 경우에서 첫 번째 반사파가 도착하는 시간 전후의 BER을 고려하였다.

표 1 수직채널에서 Bits 데이터 전송 BER

변조방식 Bit 수	FSK	BPSK	DPSK
17	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$
18	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$
...
29	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$
30	46.0×10^{-3}	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$
31	86.9×10^{-3}	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$
32	166.7×10^{-3}	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$
33	210.0×10^{-3}	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$
34	218.1×10^{-3}	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$
35	258.7×10^{-3}	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$

표 2 수평채널에서 Bits 데이터 전송 BER

변조방식 Bit 수	FSK	BPSK	DPSK
3 bits	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$
4 bits	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$
...
9 bits	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$
10 bits	26.0×10^{-4}	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$
11 bits	26.0×10^{-4}	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$
12 bits	26.0×10^{-4}	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$
13 bits	29.0×10^{-4}	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$

표 1의 수직 채널에서 해저 반사파가 도착하는 시간은 3.54msec이고 해면 반사파는 5.93msec에 도착한다. 표 2는 수평채널의 경우로 해저 반사파는 0.75msec, 해면 반사파는 1.27msec에 도착한다. 표 1과 표 2에서, FSK방식이 에러가 발생하는 시점은 해면 반사파가 영향이 미치는 시점이다. 해저 반사파의 경우 해저면의 손실이 커서 그 영향에 좌우되지 않음을 알 수 있다.

BPSK, DPSK방식은 반사파의 영향에 좌우되지 않음을 알 수 있다. 이 방식은 반사파를 고려하지 않고 연속적으로 신호를 전송할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 수중 데이터 통신을 위하여 다중경로 환경에서의 영향을 고려하였다. 수중 통신 채널에서 다중경로의 영향은 송·수신기간의 거리, 해면상태, 해저상태 등에 따라 다중경로의 특성이 결정된다. 데이터 통신에서 일반적으로 많이 사용되는 FSK, PSK, DPSK 변조 방식을 가지고 다중경로에 대한 영향을 수치 모의 실험 하였다.

수치모의실험에서 첫 번째 반사파가 도착하기 전까지 신호를 보낸후 반사파의 영향이 미치는 시간동안 신호를 보내지 않는 Time Gate 방식을 이용하면 다중경로의 영향을 줄일 수 있지만, 데이터 전송속도가 떨어지는 단점이 있다. 특히 FSK방식에서 수직채널에서 직접파와 반사파의 경로차가 크기 때문에 수평채널보다 높은 데이터 전송율을 가질 수 있다. BPSK와 DPSK는 다중경로의 영향에 민감하지 않아 데이터를 연속적으로 보낼 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Daniel B. Kilfoyle, Arthur B. Baggeroer, "The state of the Art in Underwater Acoustic Telemetry", IEEE journal of oceanic engineering, Vol. 25, No. 1, pp. 4-27, 2000
- [2] O. R. Hinton, G. S. Howe, A. E. Adams, A. G. J. Holt, "An underwater acoustic telemetry link operating at 10k baud using DPSK modulation", UDT, pp.464-470, 1992
- [3] Robert J. Urick, "Principles of Underwater Sound", 3rd edition, McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [4] R. E. Ziemer, W. H. Tranter, "Principles of Communications(Systems, Modulation, and Noise)", Fourth Edition, John Wiley & Sons, 1995
- [5] R. Galvin, R. F. W. Coates, "Analysis of The Performance of an Underwater Acoustic Communications System and Comparison with a Stochastic Model", Proc. IEEE OCEANS 94', pp.III 478-482, 1994
- [6] A. Essebbbar, G. Loubet, F. Vial, "Underwater Acoustic Channel Simulations for Communication", Proc. IEEE OCEANS 94', pp.III495-500, 1994
- [7] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics", John Wiley & Sons, INC., 1982