

수중 데이터 통신을 위한 변조방식의 성능 비교

손근영, 노용주, 윤종락
부경대학교 정보통신공학과

The Performance Comparison of Digital Modulations for Underwater Data Communication

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

요 약

수중에서 AUV신호나 화상데이터의 정확한 고속 전송 등을 위해 수중 데이터 통신에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 수중 데이터 통신에서 잔향과 배경 잡음 등의 해양 환경 특성을 극복하는 것은 신뢰성 있는 통신 환경을 이룩하는데 중요하다. 특히 해면과 해저로 이루어진 천해 환경에서 해면과 해저 반사파에 의한 영향은 수중 데이터 통신의 성능을 좌우하는 중요한 요소 중의 하나로 알려져 있다. 이러한 환경적 영향을 최소화하여 높은 성능의 통신 환경을 제공하기 위해 다중경로의 영향을 적게 받는 변조방식을 선택하는 것이다.

수중 데이터 통신에서 일반적으로 사용되는 변조방식은 FSK, PSK, DPSK 등이 있다. 본 연구에서는 해면·해저로 이루어진 해양 통신 채널에서 세 가지 변조방식의 성능을 수치모의실험을 통하여 비교·분석하였다. 수치모의실험에서 해면·해저로 이루어진 천해의 해양 통신 채널은 음원 영상법을 적용하여 구성하였으며 각 변조방식의 성능은 BER(Bit Error Ratio)로 나타내었다.

1. 서 론

인간에게 있어서 통신은 매우 중요한 수단이다. 과거부터 현재까지 통신을 위한 많은 연구가 진행되어져 왔다. 현재 대기중의 통신은 거의 완성단계까지의 연구가 진행되어 시스템에서는 물론 경제적인 면에서도 성능

좋은 유·무선 통신 시스템 개발되어 있다.

그러나 바다에 대한 관심이 고조되고 있는 현 시점에서 해양에서의 통신 시스템은 군용이나 자원탐사용으로만 개발되어 왔다. 유선통신에서는 현재 빠르게 연구가 진행되어 광섬유를 이용한 고속 통신이 이루어지고 연구 중에 있다. 그러나 무선통신에 있어 개발은 아직 미미한 편이다. 무선 통신은 해양이라는 특수한 환경의 문제 때문에 개발이 더딘 편이다.

천파는 물에서 급격한 감쇠 특성을 갖기 때문에 수중 무선 통신에 부적합하다. 그래서 해양 즉 물에서는 음파를 이용한 통신이 가능하다. 그러나 해양 매질은 통신을 하기에는 아주 까다로운 매질이다. 좋은 통신을 위해서는 대역폭이 크고 채널이 투명해야 하는데 반해, 음파는 고주파에서 손실도 크기 때문에 대역폭도 좁고, 배경잡음의 영향도 많이 받는다. 특히 다중경로에 의한 영향은 가장 심각한 문제로 대두되고 있다.

무선 통신에서는 이런 까다로운 환경을 극복하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. 현재 이런 다중경로의 극복 방법으로 많이 연구된 것으로 적응 빔포밍 기법과 적응 등화기를 사용한 방법들이 있다.

이런 무선통신 시스템은 과거에는 AM, FM 아날로그 변조방식에 제한되어 개발되어 왔으나, 현재에는 디지털 하드웨어 기술의 발전으로 디지털 변조 방식을 많이 이용하여 개발하고 있다. 본 논문에서는 무선 수중 음향 통신 시스템의 데이터 통신 시스템에서 가장 많이 쓰이는 FSK, PSK, DPSK 변조방식의 다중경로의 영향에 대해 수치 모의 실험을 통해 성능을 비교·분석하였다.

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 있는 것이다.

손실에는 경로손실과 흡수손실이 있고 March등에 의하면 수심 40m, 등음속 구조인 천해에서 약 5km 이내의 거리에서 총경로 손실 TL은 다음식으로 주어진다.

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

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

해양의 배경잡음은 다양한 요인에 의해 결정되는데, 심해에서는 동행 선박과 해상 상태에 의해 배경잡음 크기가 결정되고 천해에서는 이들 요인 외에 육상의 산업 시설에 의한 수중 진파음과 천해의 다양한 해양생물에 의한 소음에 의해서 배경잡음 크기가 결정된다. 그림 1은 내만에서의 대표적인 배경잡음 특성으로 주파수에 반비례하는 특성이다.

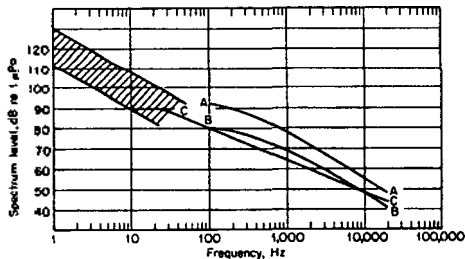


그림 1. 내만의 배경잡음[Ref. 6]

다음으로 수중음향 통신에서 가장 극복하기 어려운 환경은 다중경로에 의한 영향이다. 해면이나 해저의 경계면에 의한 반사나 방해물에 의한 반사는 송·수신기 사이에 많은 다중경로를 만든다. 특히 불완전한 경계면은 더욱 다중경로의 영향에 대한 문제를 복잡하게 만든다. 해면의 상태는 Rayleigh 파라메타 $R(R=kH \sin \theta, k$: 파수, H : 파고, θ : 해면입사각)로 주어지며, 해면의 반사계수는 주파수, 파고 및 입사각에 따라 달라진다는 특성을 보인다. 이런 다중경로의 영향에 의한 신호는 수신신호의 왜곡을 야기하여 통신에 지대한 영향을 미치게 된다. 이런 다중경로 영향의 왜곡은 송수신기가 수평방향으로 위치한 경우가 수직방향으로 위치한 경우보

다 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 높이면 다중경로의 효과를 제거할 수도 있으나 "Pointing error" 문제가 있어 이동성을 갖는 통신 시스템에서는 송·수신기는 가능한 무지향성이 요구된다. 이러한 이동성을 갖는 시스템은 도플러효과를 또한 고려해야 하는 문제가 있다.

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

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 요구되는 것으로 알려져 있다.

FSK 변조방식은 비트 준위에 따라 서로 다른 반송주파수 갖는 변조방식이다. FSK 복조기 중 인코더러턴트 검파는 반송파의 주파수와 위상에 대한 정확한 정보를 필요로 하지 않는 검파 방식으로 주파수 변별기, 직교 검파기, 영교차 검파기를 이용한 복조방식이 있고, 코히어런트 검파의 경우는 정합필터를 이용한 복조방법이 사용된다. 이런 정합필터 방법은 동기 검파이므로 수신기에서 정확한 주파수와 위상에 대한 정보를 필요로 하기 때문에 PLL을 이용하여 더 좋은 성능을 위하여 검파기를 구현할 수 있다.

BPSK 변조방식은 비트 준위에 따라 위상차가 180° 를 갖도록 하는 경우이다. BPSK의 복조방식은 위상 정보가 항상 필요하므로 동기 검파를 이용하여 복조할 수 있다. 검파 방식으로 평형변조기, 코스타즈 루프를 사용한 검파 회로를 구성한다. 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. 복조된 데이터가 원래의 부호와 반전된 것인지 아닌지에 대한 모호함을 제거하는 장점이 있다. 거기다 복조기에서 반송파를 재생시킬 필요가 없고 초기 위상동기를 요구하지 않는다. 그러나 비트의 판정오차가 쌓여 일어날 수 있다는 결점이 있다. 이것은 수신 신호의 비트 결정이 두 개의 연속된 비트 구간에 걸쳐 이루어지기 때문이다.

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

위와 같은 변조 방법에 대한 신호대잡음비에 따른 성능비교는 그림 2에 나타나 있다. 그림 2에서 보면 성능이 가장 좋은 것은 BPSK이고, 가장 나쁜 경우는 FSK이다.

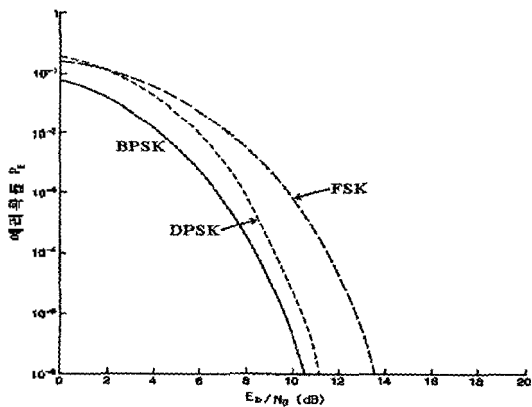


그림 2. 디지털 변조방식에 대한 에러확률(Ref. 7)

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 다중경로에 의한 반사파 효과가 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

반사파를 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 채널이고 작으면 수직적 채널로 분류할 수 있다고 알려져 있다. 수직적 채널은 직접파와 반사파와의 경로차가 커서 다중경로의 영향이 상대적으로 작은 데 비해 수평적 채널은 해면·해저의 다중경로 영향이 크다.

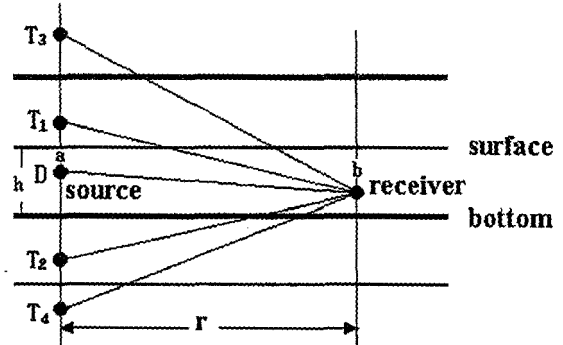


그림 3. 음파전달 경로 모델

수치 모의 실험에서는 해면, 해저, 해면-해저, 해저-해면의 4가지 다중경로만을 고려하였다. 수심(h)은 50m, 송신기의 깊이는 해면에서 2m, 수신기의 깊이는 해면에서 47m로 두고, 송신기와 수신기간의 수평거리(r)는 50, 100, 200, 400, 800, 1000m으로 변화시키며 수치 모의 실험을 수행하였다. 이때 음속은 깊이에 따라 일정하게 두었고, 해면의 반사계수를 -1로, 해저의 반사계수를 1로 두었다. 2장에서 언급한 바와 같이 채널에서의 경로 손실을 고려하였으나 흡수손실은 없는 것으로 가정하였고 신호대잡음비가 40dB로 하여 배경잡음이 거의 없는 조건으로 하였다.

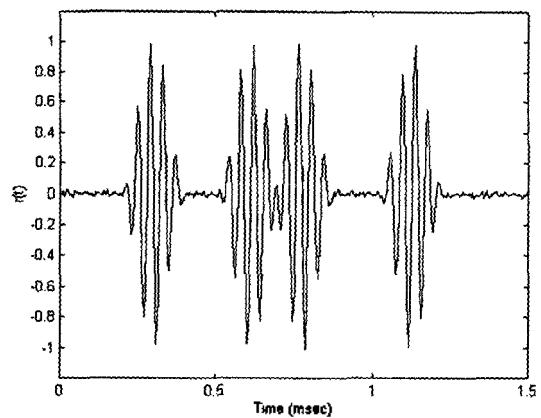


그림 4 tone burst 신호의 다중경로 응답

그림 4는 송신기와 수신기간의 수평거리가 400m인 경우 0.2ms의 지속시간을 갖는 톤 버스트 신호에 대한

수신신호 특성으로 첫 번째 파형은 직접파와 그림 3에서의 T₁, T₂, T₄에 의한 반사파를 나타내고 있다. T₃에 의한 반사파는 그 경로차가 상대적으로 커서 약 15 msec 후에 나타났다. 해면에 의한 반사, 해저에 의한 반사, 해면-해저에 의한 반사는 직접파와 경로차가 적어 경로 손실이 거의 없음을 알 수 있다.

수치모의실험은 8 비트의 짧은 데이터를 60msec 간격으로 1000회 반복하여 송·수신한 경우와 80 비트의 긴 데이터를 60msec 간격으로 100회 반복하여 송·수신한 경우에 대해 수행하였다. 표 1과 2는 각각의 경우에 대해 송·수신기간의 거리에 따른 각 변조방식에 대한 BER을 나타낸다. 여기서 총 전송 비트 수는 8000 비트이다.

표 1 8bit 데이터 전송시 수평거리에 따른 BER

변조방식 R (m)	FSK	BPSK	DPSK
50	$< 1.25 \times 10^{-4}$	$< 1.25 \times 10^{-4}$	$< 1.25 \times 10^{-4}$
100	$< 1.25 \times 10^{-4}$	$< 1.25 \times 10^{-4}$	$< 1.25 \times 10^{-4}$
200	0.1245	$< 1.25 \times 10^{-4}$	$< 1.25 \times 10^{-4}$
400	0.2410	0.0716	0.0899
800	0.2186	0.1886	0.3539
1600	0.2150	$< 1.25 \times 10^{-4}$	$< 1.25 \times 10^{-4}$

표 2 80bit 데이터 전송시 수평거리에 따른 BER

변조방식 R (m)	FSK	BPSK	DPSK
50	0.4184	$< 1.25 \times 10^{-4}$	$< 1.25 \times 10^{-4}$
100	0.2049	0.1661	0.2687
200	0.2963	0.1185	0.2061
400	0.3623	0.1186	0.1829
800	0.2303	0.2616	0.4446
1600	0.1694	$< 1.25 \times 10^{-4}$	$< 1.25 \times 10^{-4}$

표1에서 FSK인 경우 송·수신기간의 거리가 멀어질수록 데이터의 지속시간보다 직접파와 첫 번째 반사파 간의 경로차가 짧아지므로 높은 BER이 나타난다. 송·수신기간의 거리가 50m, 100m인 경우는 데이터 지속시간보다 경로차가 커서 에러가 발생하지 않았다. 표1과 2에서 BPSK는 FSK보다 낮은 BER을 나타내고 있으며, DPSK는 BPSK보다 높지만 FSK와 비슷한 BER을 보이고 있다. 수치모의실험에서는 경로손실 외에는 고려하지 않았기 때문에 반사손실을 고려하게 되면 BER은 더 낮게 나타날 것으로 생각된다. 이상의 결과에서 BPSK는 FSK보다는 다중경로의 영향에 덜 민감함을 확인할 수 있다. 따라서 고속 데이터 전송을 위한 연속

적인 데이터 비트 전송이 가능하다. 하지만 여전히 높은 BER을 나타내므로 낮은 BER을 얻기 위한 적응 빔 포밍 기법과 적응 등화기와 같은 신호처리 기법이 요구된다.

5. 결론

본 논문에서는 데이터 통신을 위하여 다중경로 환경에서의 영향을 고려하였다. 데이터 통신에서 일반적으로 많이 사용되는 FSK, PSK, DPSK 변조 방식을 고려하여 다중경로 환경의 채널을 모델링하여 다중경로의 영향을 수치 모의 실험 하였다.

수치모의실험에서 FSK는 다중경로의 영향에 민감하여 데이터 지속시간이 직접파와 첫 번째 반사파와의 시간 지연 보다 클 경우 높은 BER을 나타내었으나 BPSK와 DPSK는 다중경로의 영향에 덜 민감함을 확인할 수 있었다. 그러나 여전히 다중경로 채널에서는 높은 BER을 나타내고 있으므로 다중경로의 영향을 줄이기 위한 방법의 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 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
2. 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
3. A. Essebbbar, G. Loubet, F. Vial, "Underwater Acoustic Channel Simulations for Communication", Proc. IEEE OCEANS 94', pp.III495-500, 1994
4. 김동현, 노용주, 박문갑, 윤종락, "무선수중전화기 설계에 대한 연구", 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 제18권 제2호, pp.497-200, 1999
5. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics", John Wiley & Sons, INC., 1982
6. Robert J. Urick, "Principles of Underwater Sound", 3rd edition, McGraw-Hill Book Company, 1983.
7. R. E. Ziemer, W. H. Tranter, "Principles of Communications(Systems, Modulation, and Noise)", Fourth Edition, John Wiley & Sons, 1995