

수중에서 고속 데이터 전송을 위한 OFDM 설계

Design of OFDM System for High speed Data Transmission in Underwater

김기만, 한정우

한국해양대학교 전파공학과

요약

수중에서는 매질과 채널의 특성으로 인해 가능한 최대 데이터 전송 속도는 지상통신에서의 데이터 전송 속도에 비해 매우 낮으며, 이를 어떻게 극복하느냐가 매우 중요하다. 특히 천해(shallow water)에서 다중경로(Multipath)로 인한 지연 확산은 심볼 사이의 ISI (Inter Symbol Interference)를 유발시켜 수중 통신 시스템의 성능을 더욱 떨어뜨린다. 본 논문에서는 수중 음향 채널에서 고속 데이터 전송을 위해 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 이용한 통신 시스템을 다룬다. 다중경로로 인한 심한 심볼간 간섭을 받는 수중 채널에서 고속 데이터 전송을 위해 OFDM 방식의 통신 시스템의 성능을 평가하였으며, 이를 위해 수중 채널 모델을 이용해 영상 데이터 전송 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 서론

수중 채널은 매질의 특성으로 인해 초음파를 사용하여야 하며, 그 채널 특성은 육상에 비해 매우 복잡한 것으로 알려져 있다. 하지만 육상의 전파통신과는 달리 수중통신 시스템에 대한 연구는 상대적으로 적은 상태이다. 최근에 들어 해양에 대한 관심이 증가하면서 해양탐사 및 환경 감시를 위해 잠수정 및 센서 네트워크를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다[1][2]. 잠수정 및 센서 네트워크를 사용 및 제어하기 위해서 고속·장거리 데이터 전송이 가능한 수중 송수신 통신 시스템에 관한 연구가 중요하다. 특히 수중 채널 환경에서 다중경로 인한 지연 확산은 인접한 심볼끼리 영향을 미치는 ISI (Inter Symbol Interference)의 원인이 되어 송신된 심볼들을 왜곡시켜 수중 통신의 심각한 장애가 된다. 이러한 다중경로로 인한 수중 통신의 장애를 극복하기 위해 빔형성(Beamforming) 기법 및 MIMO 기법이 있으나, 하드웨어 및 비용에 제한이 있을 경우 사용이 어려워진다. 따라서 이러한 제한들을 극복하기 위해 대역폭의 효율적인 이용 및 다중경로로 인한 채널의 지연확산의 대처 능력이 우수한 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식이 크게 대두되고 있다.

일반적으로 OFDM 방식은 부반송파 (sub-

carrier)들 사이에 상호간의 직교성을 갖도록 주파수의 간격을 설정하여 좁은 대역폭 내의 부반송파들을 동시에 전송하는 방식이다.

본 연구에서는 수중통신에서 고속 데이터 전송을 위해 부반송파의 수를 변화시켜가며 수중채널에서의 OFDM 방식의 통신 시스템을 설계하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증하였다.

2. OFDM 전송기법

OFDM 전송기법은 다중 반송파 방식이므로 주파수 선택적 페이딩 채널을 비선택적 협대역 부채널로 변환시켜 처리할 수 있으므로 임의의 주파수 선택적 채널을 flat 페이딩 부채널의 합으로 표현가능하다. 또한 전송 심볼의 길이가 원래 심볼의 주기에 비해 병렬화 하여 모인 데이터의 수만큼 길어지게 되어 고속 전송시 발생하는 인접 심볼간 간섭(ISI) 문제도 해결할 수 있다 [1][2]. 그림 1은 OFDM 전송방식의 기본적인 블록 다이어그램 이다. OFDM 전송 방식은 고속 데이터 전송률을 갖는 열(sequence)을 낮은 전송률을 갖는 데이터 열로 나누고, 이들을 서로 직교성을 가지는 N개의 부반송파(subcarrier)로 변조시켜서 동시에 전송하는 방식으로, IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) 및 DFT를 기반으로 한다.

OFDM 심볼 사이의 간격을 T 보호구간을 T_g 라 하면 OFDM의 심볼 사이의 간격은 $T_d = T_g + T$ 로 정의 할 수 있다. 또한 부반송파 사이의 간격은 $\Delta f = 1/T$ 가 되며 k 번째 부반송파의 주파수 및 대역폭은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$f_k = f_c + \Delta f \quad (1)$$

$$B = K\Delta f \quad (2)$$

OFDM 신호는 PSK 혹은 QAM에 의해 변조된 부반송파의 합으로 구성된다. 임의의 부반송파 k 에 대한 OFDM 전송신호를 $x(n)$ 으로 표현하면

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (3)$$

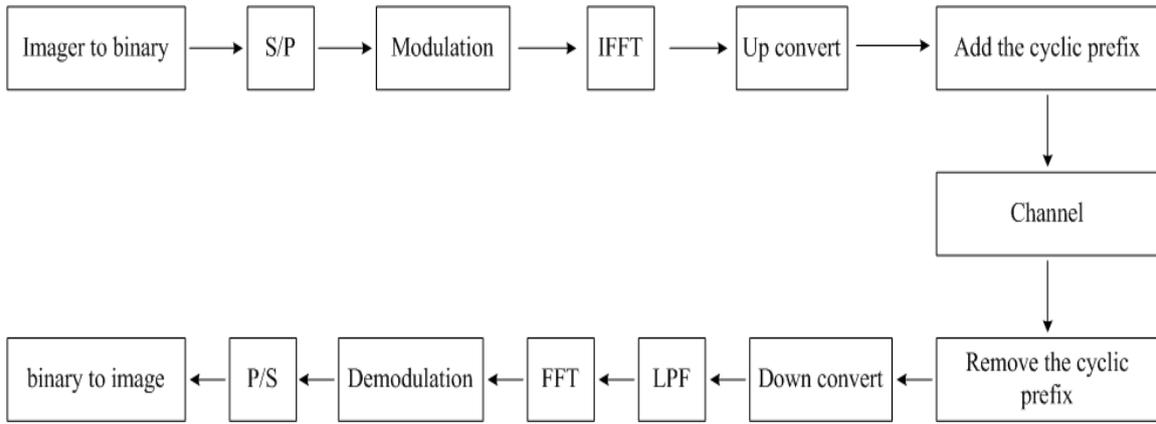


그림 1. OFDM 전송 기법의 블록 다이어그램

과 같다.

또한 다중경로 인해 발생하는 인접 심볼간 간섭 (ISI)을 더욱더 차단하기 위해 이렇게 생성된 전송신호에 보호구간(Guard Interval) 혹은 순환확장(Cyclic Extension)이 각 OFDM 심볼에 삽입된다[1]. OFDM의 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)H(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (4)$$

동기가 완벽하다고 가정할 경우, 수신 신호 $r(n)$ 은 수신기에서 DFT 복조를 통하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} R(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} r(n)e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} X(l)H(l)e^{i\frac{2\pi}{N}ln} e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} X(l)H(l)e^{i\frac{2\pi}{N}(l-k)n} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} X(l)H(l) \end{aligned} \quad (5)$$

3. 모의 수중채널 환경

3.1 수중 채널 환경

수중 환경에서 음파 신호는 수심, 수온, 전송거리, 해수면의 변화, 해저면의 상태 등으로 인해 다양하며 복잡한 특성을 가진다. 특히 천해의 경우 해수면과 해저면의 반사등으로 인해 다중경로를 포함한 다양한 특성으로 인해 수중통신의 성능 저하를 일으킨다. 특히 해저면의 상태에 따

른 신호의 지연은 진흙의 경우 10 ms, 모래일 경우 30 ms까지 신호의 지연이 발생하기도 한다 [4].

음파의 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$c = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad (6)$$

ρ 는 밀도, C는 stiffness 계수 이다. 일반적으로 음파의 속도는 공기 중에서는 340m/s, 수중에서는 1450 - 1540 m/s, 해저에서는 1500 - 2500 m/s로 알려져 있다. 특히 천해의 경우 음파의 속도가 수압의 영향 보다는 수온에 영향을 받게 되는데 그림 2에는 천해에서 깊이에 따른 음파 전달 속도의 한 예를 나타낸 것이다.

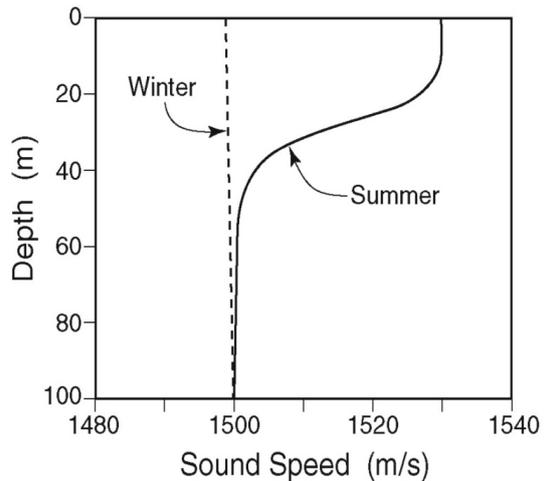


그림 2. 천해에서 음파 전달 속도 예.

3.2 모의 수중 채널 환경

본 논문에서 시뮬레이션에 사용한 모의수중 채널

널환경 파라미터는 그림 3과 같다. C_w 는 water sound speed, ρ_w 는 water density, C_b 는 bottom sound speed, ρ_b 는 bottom density, α_b 는 bottom attenuation 을 나타낸다. 시뮬레이션을 위한 모의 수중 채널의 환경은 수심 100 m, 송신기 수심 50 m, 수신기 수심 20 m, 그리고 송신기와 수신기 사이의 거리는 1 km로 가정하였다.

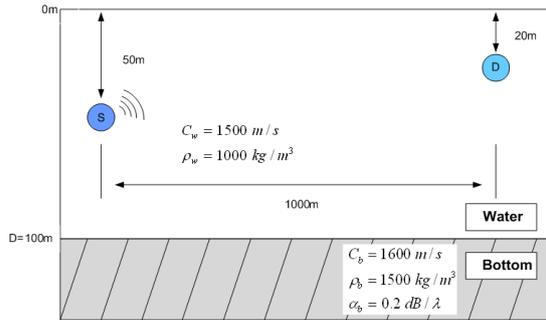


그림 3. 모의 수중 채널 환경

이러한 파라미터들을 기초로 Raymode 모델을 이용하여 모의 수중 채널의 impulse response를 계산하였으며, 이를 이용하여 수중 채널에서의 고속데이터 전송 시 OFDM의 성능을 평가하였다. 그림 4는 모의 수중채널 impulse response의 한 예를 나타낸다.

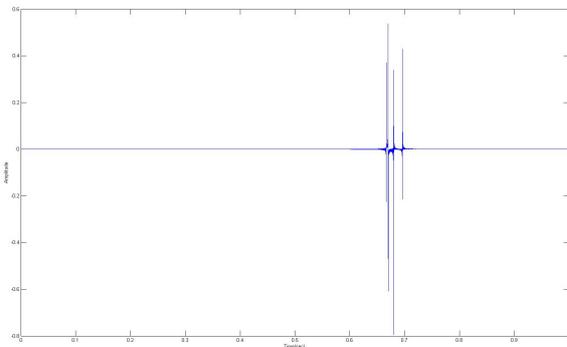


그림 4. 모의 수중 채널의 임펄스 응답

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 다중경로로 인한 심한 심불간섭을 받는 수중 채널에서의 고속데이터 전송을 위해 OFDM 방식의 통신 시스템을 설계하기 위해 수중 채널 모델을 이용해 이미지 전송 시뮬레이션을 수행하였다. 수중 통신에서 전송 방식은 QPSK 변조를 이용하고, 부반송파의 개수는 512개로 하였으며, 이중 400개의 부반송파만 정보를 가지고 나머지는 가상 부반송파로 두었다. 보호구간은 N/4로 설정하였다. 데이터 전송

속도는 5 kbps로 설정하였으며, OFDM의 경우 보호구간의 삽입으로 인한 데이터량 증가로 전송속도가 약 3 kbps가 된다.

그림 5는 소스 영상으로 각 픽셀 당 8비트로 양자화되어 있는 100×100 영상이다. 그림 6은 앞서 설명된 모의 수중채널에서 QPSK 변조를 사용한 통신의 결과이며, 그림 7은 QPSK변조와 OFDM 방식을 사용한 통신 방법의 결과이다. 이때 채널 코딩이나 등화기(equalizer)와 같은 기법들은 적용하지 않았다.



그림 5. 모의실험에 사용된 원본 이미지

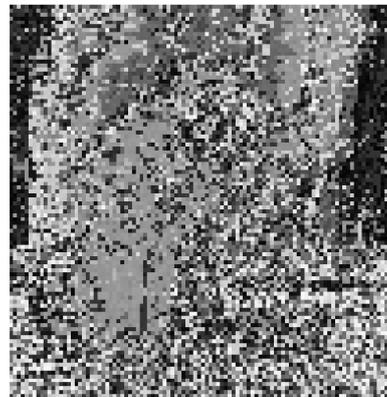


그림 6. QPSK 변조를 이용한 수중통신의 결과

Oct. 1995.



그림 7. QPSK 변조를 이용한 수중통신의 결과

그림 6과 그림 7의 결과를 비교해 볼 때 OFDM을 이용한 전송방식이 단순한 기존의 변조방식을 이용한 전송방식에 비해 향상된 성능을 보인다. 이는 다중경로로 인한 영향이 줄어들어 나타난 결과이다.

4. 결론

본 논문에서는 수중 채널에서 고속의 데이터 전송을 하기 위해 OFDM 방식의 통신 시스템을 설계하였다. 모의 수중 통신 실험을 한 결과 OFDM 통신 방식이 다중경로에 강하다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 추후 연구에서는 등화기의 사용 및 다양한 수중채널의 환경을 고려한 모의 수중 통신 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 수조 및 해양 환경에서 실제 실험이 따라야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.(계약번호 UD070054AD)

참고문헌

- [1]. Nee.R.V. and Prasad.R, OFDM for wireless multi-media communications, Artech House, 2000
- [2]. Bahai.Ahmad R.S, Saltzberg.Burton R, Ergen. Mustafa. Multi-carrier digital communications : theory and applications of OFDM, Springer, 2004
- [3]. B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, and L. Freitag, "Non-uniform doppler compensation for zero-padded OFDM over fast-varying underwater acoustic channels," in *Proc. of MTS/IEEE OCEANS conference*, June 2007.
- [4]. S. Coatlan and A. Glavieux, "Design and test of a coding OFDM system on the shallow water acoustic channel," in *Proc, of MTS/IEEE OCEANS conference*, Vol.3, pp.2065-2070,