

수중채널에서의 OFDM 시스템 디자인

전형원, 이수제, Le Tran Tien Khanh, *이흥노
광주과학기술원 정보통신공학부

E-mail : hyeongwon@gist.ac.kr, sujerago@gist.ac.kr, kog1986@yahoo.com, *heungno@gist.ac.kr

OFDM System Design Based on Underwater Acoustic Channel

Hyeong-Won Jeon, Su-Je Lee, Le Tran Tien Khanh, *Heung-No Lee
School of Information and Communications
Gwangju Institute of Science and Technology

Abstract

In underwater acoustic channels, many parameters have an effect on the channel responses. In particular, multipath wave propagation caused by multiple reflections from the sea-bottom and the sea-surface is an important problem because it may result in large delay dispersion. In this paper, we aim to use an OFDM system to deal with the delay dispersion problem. This is motivated by the recent advances in OFDM systems for radio frequency channels.

I. 서론

기존의 수중 음향통신은 주로 군사적인 목적을 위하여 제한적으로 사용되어왔다. 수중 음원 탐지나 수중 운동체 추적, 잠수함 등 UV(Underwater Vehicle)와의 통신을 위해 주로 연구되었으나 해양에 관한 관심이 고조되고, 해양 자원 탐사나 해양 센서 네트워크를 이용한 해양 환경 모니터링 감시에 대한 연구가 활발해지면서 그 활용분야가 확대되었다. 하지만 국내의 기술 수준은 아직 미미한 수준이다.

수중채널에서의 음파는 매질에 감쇄 혹은 흡수되기 때문에 대역이 제한되며, 다중경로에 의하여 지연시간 확산(Travel time spreading)과 도플러 확산(Frequency spreading)을 겪는다[1][2]. 이러한 제한들을 극복하기 위해 효율적인 대역폭 이용 및 다중경로에 의한 지연 시간확산에 대한 대처 능력이 우수한 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식이 크게 대두되고 있으며 수중채널에서의 OFDM 적용에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[3][4].

본 논문에서는 2.1 채널모델링을 통하여 수중채널 분석에 따른 모의 수중채널을 수립하고, 2.2에서 이를 기반으로 한 OFDM 시스템 설계 이론에 대해 논하였다. OFDM 시스템 설계 시 필요한 파라미터들을 정하는 방법에 대해 2.3 OFDM 시스템 파라미터에서 논하고 결론을 내리고자 한다.

II. 본론

2.1 채널모델링

수중채널모델링은 해수면, 해저면, 온도, 염도, 거리, 반송파 주파수, 대역폭 등 관련된 요소에 따라 매우 복잡하며 시스템에 반영함에 있어서 많은 문제점을 지닌다[3].

1) * 교신저자

2) This work was supported by the Korea National Research Foundation (NRF) Grant K2090100004-09E0100-00410.

본 논문에서는 수중채널을 해수면, 해저면의 공간적 불변, 수온 분포에 따라 분석하여 보고, 수중 채널이 시불변성을 가지는 조건에 대하여 고찰해 보고 그에 합당한 OFDM system을 응용한 통신 방법을 강구하고자 한다.

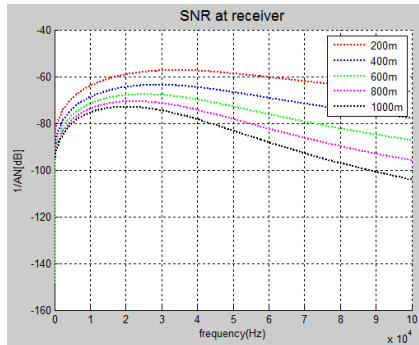


그림 1. 수신단의 SNR

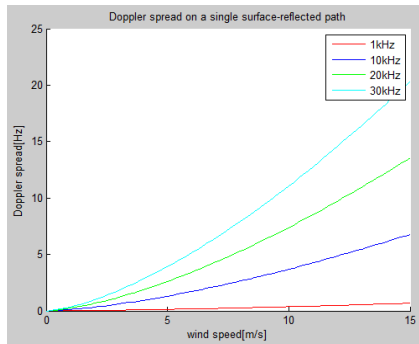


그림 2. 수중채널에서의 도플러주파수

그림 1과 그림 2는 각각 수신단의 SNR과 수중채널에서의 도플러주파수를 나타낸다. 이는 OFDM 시스템 파라미터 설정에서 고려해야할 중요한 사항이다. 수중채널에서의 OFDM 시스템을 디자인할 때는 도플러확산에 의해 반송파간의 직교성이 무너지지 않는 범위에서 반송파주파수를 선택해야 한다. 높은 반송파 주파수 선택은 넓은 대역폭 사용의 이득을 얻지만, 무시할 정도의 도플러 확산을 야기하기 때문에 반송파간의 직교성을 쉽게 무너뜨려 주파수효율을 높이기가 매우 어렵다[4]. 따라서 대역폭과 도플러주파수 사이의 상충관계에서의 반송파 주파수 선택은 OFDM 시스템 설계에서 중요한 사항이다.

본 논문의 모의 수중채널은 서해 평균 수심인 44m를 수심으로, 송수신단은 각각 22m 수심에 위치하여 1000m 떨어져있음을 가정하였다. 그림 1에서 SNR이 가장 높은 지점인 20kHz를 반송파 주파수로, -80dB를 threshold로 하여 30kHz(5kHz-35kHz)를 대역폭으로 설정하였다. 20kHz 반송파 주파수에서의 도플러주파수는 그림

2와 같이 0-15Hz이나, 풍속이 5m/s를 가정하여 도플러 확산에 의한 반송파의 직교성이 무너지지 않음을 가정하였다.

그림 3과 그림 4는 모의 수중채널에서의 다중경로와 이로 인한 지연확산(Travel time spreading)에 따른 정규화된 시스템 임펄스응답을 나타낸다.

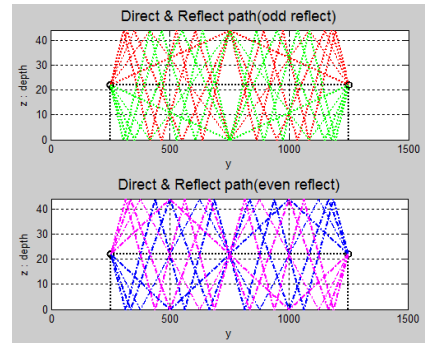


그림 3. 수중채널에서의 다중경로

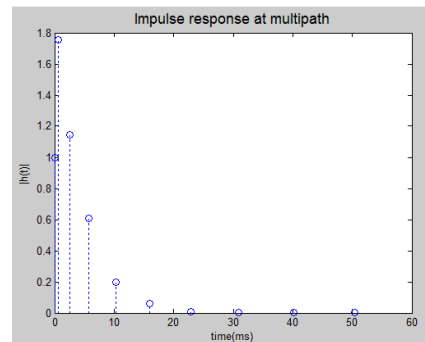


그림 4. 수중채널에서의 임펄스응답

시불변 수중채널의 경우 임펄스 응답은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$h(\tau) = \sum_p h_p \delta(\tau - \tau_p) \quad (1)$$

τ_p 는 다중경로 Ray 각각의 시간 지연을 나타내고 h_p 는 복소수 값을 가지며 각 경로에 해당하는 감쇄를 나타낸다. 본 논문의 시불변 모의 수중채널의 경우 정규화 후 유효한 다중경로 Ray는 5개, τ_{max} 는 16ms이다.

2.2 수중채널에서의 OFDM 시스템

식 (1)에 따른 입력 $x(t)$ 와 출력 $y(t)$ 의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(t) = x(t) * h(t) + n(t) = \sum_p h_p x[t - \tau_p] + n(t) \quad (2)$$

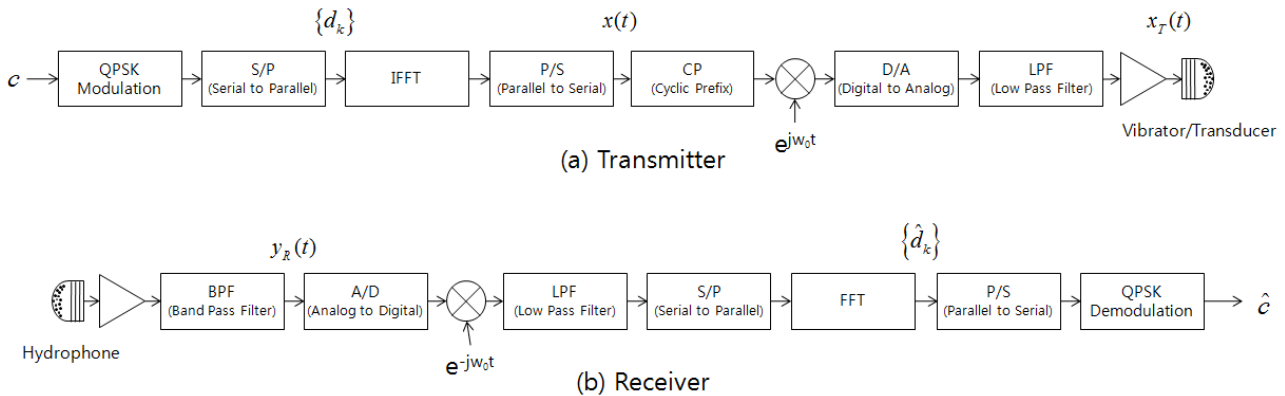


그림 5. OFDM 시스템 블록다이어그램

여기서 $n(t)$ 는 평균이 0이고 분산이 $N_0/2$ 인 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 잡음이다. 전송신호는 채널의 지연시간 확산에 의한 주파수 선택적 특성을 겪게 된다. 주파수 선택적 특성에서의 상관대역폭 (Coherent Bandwidth)은 임펄스 응답의 최대시간지연인 τ_{max} 값에 반비례한다[5].

그림 5는 제안된 수중채널에서의 OFDM 시스템 블록다이어그램을 보여주고 있다. 낮은 반송파 주파수를 사용하는 수중채널환경에서 OFDM 신호는 도플러 확산에 의한 주파수 오프셋(offset) 현상을 무시할 수 있다[5].

그림 5. (a)에 따라 입력 데이터는 QPSK방식으로 변조되어 각각의 d_k 를 구성한다. d_k 신호들은 IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform)를 거쳐 다중 부반송파에 맵핑되어 전송된다. T 초의 OFDM 심볼 신호는 직교성을 유지한 N 개의 부반송파로 구성되며 각각의 부반송파는 $1/T$ Hz 간격으로 구성된다.

OFDM 시스템에서의 전송은 심볼 단위로 이루어지며 다중경로의 영향으로 ISI(Inter-Symbol Interference)가 발생하여 이전 심볼에 의해 영향을 받게 된다. 이런 ISI를 완화시키기 위해 연속된 OFDM 심볼 사이에 최대지연 확산(τ_{max})보다 긴 보호구간을 삽입하게 되는데 이로 인해 OFDM 심볼 주기는 유효 OFDM 심볼 주기와 보호구간의 합이 된다. 직교성의 파괴를 방지하기 위해 유효 심볼 구간의 마지막 구간 신호를 복사하여 삽입하게 되는데 이 보호구간을 Cyclic Prefix(CP)라고 한다[6]. 이러한 과정을 통하여 만들어진 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j\frac{2\pi}{T}kt} \quad (3)$$

$$x_T(t) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j2\pi(\frac{k}{T}+f_c)t} \quad (4)$$

여기서 f_c 는 반송파주파수, $x(t)$ 는 기저대역에서의 신호를 나타내고 $x_T(t)$ 는 반송파주파수에 의해 변조되어 전송되는 실제 신호를 나타낸다. 식 (2)와 (4)로부터 수신된 신호를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_R(t) = \sum_p h_p \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j2\pi(\frac{k}{T}+f_c)[t-\tau_p]} + n(t) \quad (5)$$

이렇게 수신된 신호는 T_s 에 맞추어 샘플링 되는데 T_s 는 심볼 주기인 T 를 FFT 사이드로 나눈 값이다. 동기가 완벽하게 일치되게 샘플링 된 후 기저대역으로 천이된 신호는 다음과 같다.

$$y(mT_s) = \sum_p h_p \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j2\pi(\frac{k}{T}+f_c)[mT_s-\tau_p]-j\omega mT_s} + n(mT_s) \quad (6)$$

$n(mT_s)$ 는 채널노이즈의 샘플링 된 값이다. 만약 채널을 정확히 추정하였다고 가정할 경우 주파수 영역에서의 디지털 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$Y[k] = H[k]d_k + N[k] \quad (7)$$

여기서 $H[k]$ 는 추정된 채널로서 식(1)에 있는 임펄스 응답의 푸리에 변환된 식이고, $Y[k]$ 는 k 번째 부반송파에 실린 복소수 데이터를 의미한다. $N[k]$ 는 샘플링 된 노이즈인 $n(mT_s)$ 의 푸리에 변환된 식이다[7].

노이즈와 채널 보상에 의해 신호는 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{d}_k = \frac{Y[k]}{\hat{H}[k]} \quad (8)$$

이러한 d_k 를 얻는 과정은 DFT 과정과 같으므로 OFDM 시스템의 구현이 용이하다.

2.3 OFDM 시스템 파라미터

수중채널에서는 다중경로에 의해 주파수 선택적인 채널이 형성되기 때문에 본 논문에서는 이러한 특성을 완화시키기 위하여 OFDM 방식을 사용했다.

표 1은 우리가 제안하는 OFDM 시스템 파라미터이다. 앞서 언급한대로 주파수 대역폭은 30kHz(5kHz-35kHz)로 설정하였다. 그림 4에서 알 수 있듯이 최대 시간지연은 16ms이며 따라서 ISI를 완화시키기 위한 CP 시간은 16ms 이상이어야 한다. FFT 사이즈는 부반송파 주파수의 값이 상관대역폭보다는 작고, 최대 도플러주파수보다는 크게 정해야하기 때문에($B_c \gg \Delta f \gg B_{Dmax}$) 이 조건을 만족하는 1024로 정하였다[4]. 따라서 정보를 담고 있는 각각의 부반송파 Δf 는 29.3Hz이며 CP 시간을 고려한 OFDM 심볼 주기는 50.13ms 이다.

파라미터	값
전송 주파수 대역 (Transmission Frequency Band)	5 - 35 kHz
전송 대역폭 (BW)	30kHz
반송파 주파수 (Center Frequency)	20kHz
최대 도플러주파수 (Maximum Doppler Spread : B_{Dmax})	2.5Hz
최대 시간지연 (Maximum Delay Spread : τ_{max})	16ms
상관대역폭 (Coherent Bandwidth : $B_c=1/\tau_{max}$)	62.5Hz
FFT 사이즈 (N_{FFT})	1024
부반송파 주파수 ($\Delta f = BW/N_{FFT}$)	29.3Hz
유효 OFDM 심볼 주기 ($T_b = 1/\Delta f$)	34.1ms
CP 시간 ($T_g \geq \tau_{max}$)	16ms
OFDM 심볼 주기 ($T_s = T_g + T_b$)	50.13ms

표 1. OFDM 시스템 파라미터

III. 결론 및 향후 연구 방향

3.1 결론

본 논문에서는 수중채널을 분석하고 수중채널 모델링을 통한 임펄스응답을 얻었다. 이를 기반으로 다중 경로에 적합한 OFDM 시스템 디자인에서 필요한 파라미터 설정에 대해 논하였다.

3.2 연구 방향

수중채널의 임펄스응답은 시뮬레이션 환경의 변화(송수신단 각각의 수심, 거리, 바다의 수심)에 따라 현격히 변화하기 때문에 시뮬레이션 환경의 변화에 따른 임펄스응답의 분류 및 세분화 분석이 필요하다. 또한 풍속이 빨라지고 반송파가 높아질수록 채널의 도플러 주파수가 급격히 커지게 되므로, 더 이상 시뮬변성을 가정할 수 없고 시변채널에 대한 시스템 디자인을 해야 한다. 시변채널의 경우에는 Water-filling 등과 같이 주어진 파워를 최적화하는 방법을 적용하고자 계획하고 있다.

참고문헌

- [1] M. Stojanovic, "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel," Proc. of WUWNET, Los Angeles, CA, Sept. 2006.
- [2] P. Qarabaqi and M. Stojanovic, "Statistical modeling of a shallow water acoustic communication channel," Proc. Underwater Acoustic Measurements Conference, Nafplion, Greece, June 2009.
- [3] 배종태, 김민혁, 최석순, 정지원, 천승용, 도경철, "수중통신채널에서 고려되는 채널 부호의 성능 분석," 한국음향학회지 제27권 제6호 pp. 286~295, 2008
- [4] 김병철, I-Tai Lu, "OFDM 수중음향통신 신호처리 설계와 성능평가," 2004년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제23권 제2(s)호
- [5] B. C. Kim and I. T. Lu, "Parameter study of OFDM underwater communications system," in Proc. of MTS/IEEE Oceans, Providence, Rhode Island, Sept. 11-14, 2000
- [6] 조용수, "OFDM 기술 동향," Telecommunication Review, 12권 4호, pp. 466-478, 2002.
- [7] J. Huang, S. Zhou, and P. Willett, "Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication," in Proc. of MTS/IEEE OCEANS conference, Kobe, Japan, April 8-11, 2008.