수중 음향 채널에서 적응형 OFDM의 성능 분석

임요웅* · 강희훈**

Performance analysis of an adaptive OFDM over an underwater acoustic channel

Yo-woong Im* · Hee-hoon Kang**

요 약

최근 심해 해난 구조 통신, 해저 탐사와 환경오염에 대한 모니터링과 같은 서비스에서 수중 음향 채널을 통한 데이터의 전송은 고속이 요구되고 있다. 수중 음향 채널은 매우 복잡하고 지속적인 시변 특성을 가지므로 기존의 무선 통신 기술들은 좋은 성능을 나타내지 못한다. 이러한 수중 음향 채널에서 고속 전송을 제공하고 열악한 환경에 대해서 신뢰성이 있고 강건한 통신 서비스를 제공하기 위해서 본 논문에서는 적응형 OFDM 시스템의 성능을 분석한다. 이를 통해서, 음성 통신 서비스를 기준으로 수중 음향 채널에서 적절한 적응 알고리즘의 적응 스위칭을 위한 임계값을 제시한다.

ABSTRACT

Such as disaster rescue in deep water, undersea exploration and monitering for environmental pollution, many applications require the acoustic communication for high data rate over underwater acoustic channel. As underwater channel is very complex and is time-varying, conventional single carrier communication has good performance. In this paper, An adaptive OFDM system is analyzed for high data rate and reliability and rubust service over UWA channels. Through the adaptive system, we show threshold switching for an adaptive algorithm.

키워드

Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM), Acoustic, Underwater Communication, Multipath, Doppler shift

Ⅰ. 서 론

지난 10여년동안 수중 음향 통신(UnderWater Acoustic Communication:UWAC)은 지속적인 발전을 거듭해 왔다. UWAC은 최근 환경 시스템의 오염 감시, 해양 오일 산업의 원격제어나 심해의 과학적 데이터 등을 수집하기 위해서 다양한 분야에서 관심이 집중되고 있다. 상업적이나 군사 분야와 같은 많은 응용 분야에서 잠수함이나 심해 무인 장치와의 실시간 통신에 대한 요구가 증가하고 있는 추세이다. 이러한 수중 음향 통신에서 고속 데이터를 전송할 수 있는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송기술이 적용되고 있다.[2]-[5]. 수중 전송매체를 사용하는데 있어 주된 제약은 매우 복잡하고 지속적으로 변화하는 바다의 특성이다. 그럼에도 불구하고, UWAC에서 수중 채널은 사용되고 이를 위해 가장 일반적인 모드로 음파를 사용하고 있다. 그러므로 UWA 매체의 사용은 아날로그 음성 통신 시스템으로

* (주)준영시스템 대표이사
** 여주대학교 전자과 교수
접수일자 : 2010. 08. 20 심사(수정)일자 : 2010. 09. 20 게재확정일자 : 2010. 10. 15

제한되어 왔다. 이러한 통신은 단지 긴급통신에 한정되어 있다. 그러나 다양한 해양 서비스를 위해서 고속의 데이터 전송이 요구되고 있으며 그에 따른 신뢰성도 요구되고 있다. 이러한 요구에 대해서 수중 채널의 복잡성과 지속적인 시변 특성에 대해서 고속의 데이터 전송을 보장하고 통신 시스템의 신뢰성과 강건성을 제공하기 위해서 적응형 OFDM를 고려하여 성능을 분석한다.

II. 적응형 OFDM의 시스템 모델

그림 1은 수중 음향 채널에 적용된 적응형 OFDM의 시스템 블록도를 나타낸다. 채널상태 평가와 모드 선택은 수신단에서 이루어지고 역방향 채널을 통해서 다음 전송에 대한 정보가 송신기에 전달된다.[6]. 이 모델에서 적응은 프레임 단위로 이루어진다.

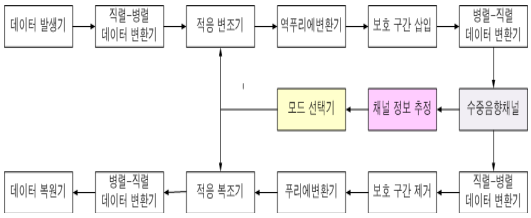

그림 1. 수중 음향 채널에 적용된 적응형 OFDM 시스템 블록도
Fig. 1 The adaptive OFDM system under an underwater acoustic channel

부채널 적응 전송방식으로 사용하여 수중 채널에서의 적응형 OFDM에 대한 성능을 분석한다. 부채널 적응 OFDM 전송에서, 심볼은 모든 부반송파들은 인접한 부반송파의 블록으로 분할된다. 동일한 모드가 모든 부대역의 부반송파에 대해서 적용된다.[7]~[10]. 다음 OFDM 심볼에 대한 송신기에 의해서 사용될 모드는 현재의 OFDM 심볼에 기반한 수신기의 채널 상태의 정보에 의해서 결정된다. 본 논문에서는 채널을 추정하기 위해서 파일럿 심볼을 사용한다. 채널의 상태는 주파수 선택적 채널에 대해서 각각의 부반송파에서 다르다. 채널 상태 추정기를 사용하여 각 채널에서 수신된 신호의 순시 SNR(Signal to Noise power Ratio)를 계산한다. 계산된 순시 SNR에 기반하여, 다음 전송 프레임에 대해서 가장 좋은 모드가 선택된다. 이러한 과정은 모드 선택기 블록에서 이루어진다. 송신단의 적응 변조기 블록은 다른 여러 변조 모드들 제공한다. 이들 변조방식에 대한 스위칭은 평균 순시 SNR에 의해서 결정된다.

본 논문에서는 BPSK(Binary Phase Shift Keying), QPSK(Quadrature Phase Shift Keying), 16진 QAM(16-ary Quadrature Amplitude Modulation), 64진 QAM(64-ary Quadrature Amplitude Modulation)를 사용한다. 적응변조의 목적은 각 부대역의 전송에 있어 주어진 SNR에 대해서 스펙트럼 사용효율과 전체 BER(Bit Error Rate) 성능사이의 좋은 트레이드-오프(Trade-Off)를 얻기 위해서 적절한 변조 모드를 선택하는 것이다. 부반송파에서 수신된 신호는 식(1)과 같이 표현된다.

$$R_n = H_n X_n + W_n \quad (1)$$

여기서 H_n은 부반송파에 채널 계수이고 X_n은 송신된 심볼이고 W_n은 가우시언 채널 표본이다.

2.1 수중 음향 채널의 특성

수중 음향 통신채널은 매우 복잡한 특성을 나타낸다. 이러한 복잡성은 채널이 이질적이라는 것을 나타낸다. 주로 고체나 기체의 입자들에 의해서 수중의 이질성과 밀도 그리고 온도 기술에 의해서 수중 채널의 불완전성이 나타난다.

일정한 바닷물의 이동과 해저 바닥과 해수표면과 같은 채널 경계들은 복잡성을 더 증가시킨다. 이러한 복잡한 채널 특성의 영향은 강력한 다중 경로와 도플러 현상을 나타낸다. 이러한 현상들은 일정하지 않고 지속적인 시변 특성을 가진다. 수중 채널에 대한 복잡한 특성은 아래와 같은 4가지의 관점에서 정의할 수 있다.

a) 간섭과 반향.
b) 기하학적인 왜곡과 흡수에 기인한 전송 손실
c) 환경 잡음
d) 송신기와 수신기사이의 상대적인 이동으로 인한 도플러 확산.

2.2.1 다중경로 현상

그림 2는 수중 음향 채널의 다중경로를 나타낸다. 해표면과 해저바닥의 경계는 에너지를 반사한다. 이러한 반사파는 다양한 경로를 통해서 송신기에서 수신기에 도달한다. 이는 더 나아가 불완전한 경계에 의해서 보다 복잡해진다. 수중 경로의 전체적인 다중경로 현상은 신호의 시간 분산을 야기한다. 시간 확산은 깊은 수중의 수초에 비해서 얕은 수중에서 수백 밀리초 만큼 많은 높을 수 있다. 높은 주파수에서, 전체 시간 확산은 경계에서 흡수와 수중에서 감쇠로 인해서 적다.

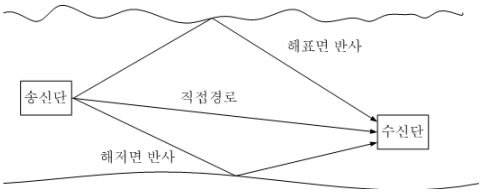

그림 2. 수중 음향 채널의 다중경로 모델
Fig. 2 Multipath Model of an underwater acoustic channel

본 논문에서의 채널 모델은 다음과 같은 파라미터를 적용한다.[11].

- 채널길이 : 2000[m]
- 채널 깊이 : 300[m]
- 송수신기의 깊이 : 50[m]
- 해수면과 해저면에 의한 손실 : 3[dB]

위의 수중 음파 채널에서 2차 다중경로는 사용하지 않았으며 다중경로 중 가장 큰 영향을 미치는 1차분만을 적용하였다. [11]로부터 채널모델은 직접파와 감쇠를 겪은 1차 다중경로의 손실을 4[dB]로 설정하고 있으며 직접파 신호의 0.63배에 해당한다.

2.2.2 전송 손실

음파의 세기는 기하학적 확산과 흡수 매커니즘에 의해서 수중을 전파하는 동안 감쇠된다. 수중에서 음파의 감쇠는 RF(Radio Frequency) 전자기파에 비해서 무시될 수 있지만 수중에서 흡수되는 에너지의 손실은 상당하다. 기하학적 확산에 기인한 손실은 구형이거나 원통형 특성이다. 이는 전송손실(Transmission Loss:TL)이라고 표기하며 식(2)와 같다. 단위 범위당 손실은 주파수 f와 감쇠상수 α의 함수이고 하며 단위는 [dB]이다.

$$TL(f) = 20\log R + \alpha(f)R \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서 R은 방사원으로부터 복사 거리이다.

2.2.3 환경 잡음

환경 잡음은 수신된 SNR에 영향을 주고 송신 전력을 조절하게 한다. 환경 잡음 관심 영역에 대해서 주파수에 따라 일반적으로 감소한다. 해변 환경이나 수중 작업장은 깊은 해저 환경보다 잡음이 더 많다.

2.2.4 도플러 영향

이는 송신기와 수신기 사이의 상대적인 이동이나 물의 이동에 의해서 나타난다. 한 방향에 대해서 1[knots.KHz]당 0.35[Hz]의 주파수 천이가 발생한다. 상대적인 이동이 양방향인 경우, 0.70[Hz/(knots.KHz)]의 주파수 천이가 발생한다. 흡수 손실과 송수신기 특성에 의해 야기되는 채널 대역의 부족으로 인해서, 도플러 확산은 가용 대역을 축소시킨다.

2.2 채널보상과 채널추정

VoIP 채널에 전송된 신호는 채널의 여러 현상에 의해서 영향을 받는다. 전송 신호에 영향을 주는 채널의 상태를 추정하기 위해서 주기적인 파일럿 심볼을 전송한다. 파일럿 심볼은 송신기와 수신기에서 사전에 알고 있는 정보를 사용한다. 전달 함수는 식(3)과 같은 탭을 가진 FIR(Finite Impulse Response) 필터로 산출된다.

$$\widehat{H_n} = \frac{Y_n}{X_n}, \qquad 0 \le n \le N-1 \quad \cdots\cdots (3)$$

여기서 Y는 수신된 파일럿 심볼이고 X는 원래의 전송 파일럿 심볼이고 N는 부채널의 수이다. $\widehat{H}$는 유입되는 데이터 심볼에서 대해서 채널 보상을 위해서 사용된다. 식(4)와 같이 $\dot{S}$은 $\widehat{S}$를 결정하기 위해서

복조에 사용된다.

2.3 적응 알고리즘

적응 알고리즘은 그림 3과 같은 흐름도로 구성된다.

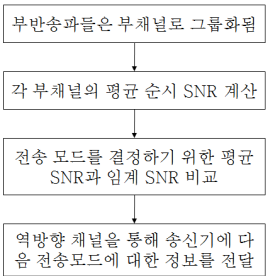

그림 3. 적응 알고리즘 흐름도
Fig. 3 The flow diagram of an adaptive algorithm

부채널을 효과적으로 사용하려면, 부채널의 SNR를 계산하여야 한다. SNR은 각 심볼 블록의 끝단에서 계산되고 이는 다음 심볼 전송을 위한 부채널의 예측 SNR로 사용된다. SNR이 높을 경우, 스펙트럼 사용효율이 좋은 변조방식을 할당하고 SNR이 좋지 못할 경우, 채널에 강건한 변조방식을 사용한다. SNR의 계산은 채널의 신호 진폭을 추정함으로써 얻어진다. 식(4)의 채널 전달함수는 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\widehat{H_n} = \frac{1}{K_p + K_d + K_m} \sum_{k=0}^{K_p+K_d+K_m-1} \frac{Y_n[k]}{\widehat{S_n[k]}}, \quad \cdots\cdots (5)$$

$0 \le n \le N-1$

여기서 K_p는 파일럿 OFDM 심볼의 수이고 K_d는 데이터 OFDM 심볼의 수이고, K_m은 변조된 OFDM 심볼의 수이다. $\widehat{S_n}$는 평가된 심볼이고 Y_n은 수신된 심볼을 나타낸다.

수신된 심볼과 예측된 채널에 대해서 평가된 심볼의 분산을 계산하면 식(6)과 같다.

$$P_b = \frac{1}{K_p + K_d + K_m} \sum_{k=0}^{K_p+K_d+K_m-1} \left| Y_n[k] - \widetilde{H_n}\widehat{S_n}[k] \right|^2, \quad (6)$$

$0 \le n \le N-1$

전송된 심볼의 평균 전력을 $P_s = 1$이라고 하면 SNR은 식(7)과 같다.

$$SNR_n = \frac{P_s \left|\widetilde{H_n}\right|^2}{P_n} = \frac{\left|\widetilde{H_n}\right|^2}{P_n} \quad \cdots\cdots (7)$$

2.4. 모드 스위칭 임계값

다른 모드들에 대한 스위칭 임계값은 고정 모드 변조 시스템의 성능을 기반으로 한다. 적응 변조방식에서 스위칭 알고리즘은 표1에 나타낸다.

표1. 기준 SNR값에 따른 변조 방식 스위칭
Table 1. Reference SNR for modulation mode switching

변조모드	임계 신호대 잡음비
BPSK	SNR ≤ 10[dB]
QPSK	10[dB]<SNR ≤ 18[dB]
16QAM	18[dB]<SNR ≤ 26[dB]
64QAM	26[dB]<SNR

III. 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션에서 적응형 OFDM 변조방식에 대해서 비트오류율 성능과 처리량(Throughput)에 대한 성능을 분석한다. 또한 스위칭을 위한 기준 BER과 목적으로 하는 BER에 대해서 적응하는 방식으로 처리량을 분석한다. 시뮬레이션을 위한 OFDM 시스템 파라메터를 표2에 정리한다.

표2. 시뮬레이션을 위한 OFDM 시스템을 위한 파라메터
Table 2. Parameters for the adaptive OFDM simulation.

파라메터	값
표본주파수	34900[Hz]
FFT/IFFT	1024
보호구간/주기 프리픽스	4[ms]

부반송파 변조	BPSK/QPSK/ 16진 QAM/64진 QAM
심볼 구간(주기 프리픽스 제외)	40[ms]
심볼 구간(파일럿 심볼 포함)	45[ms]
부반송파 수	180
반송파 간격	22[Hz]
주파수 대역	10000~13960[Hz]

그림 6은 백색 가우시언 채널을 기준으로 BER=0.001로 설정한 적응형 OFDM의 BER 성능을 나타낸다. 그림 6에서 SNR이 7[dB]정도에서 변조모드가 BPSK에서 QPSK로 변환되었으며 대략 11[dB]이상에서 QPSK에서 16진 QAM으로 변환되었으며 대략 18[dB]에서 64진 QAM으로 변환되었음을 알 수 있다. 이는 무선 음성 통신에서 적용되는 서비스 품질을 기준으로 한 것이다. 그러나 실제 BER은 0.001을 유지하지 못하고 0.01에서 0.001사이에 위치하게 된다. 그러므로 음성 통신 서비스를 제공하기 위해서 BER 기준으로 하는 것보다 SNR로 하는 것이 바람직하다. BER=0.001의 기준일 때 데이터 처리량을 나타내는 그림 4는 그림 5에 비해서 데이터 처리량은 보다 좋으나 이는 BER 성능과의 트레이드-오프를 고려하여 적절하게 선택되어야 한다.

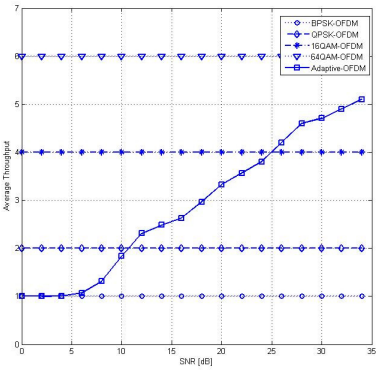

그림 4. 스위칭 기준 BER=0.001일 때 데이터 처리량
Fig. 4 Throughput performance for adaptive OFDM under BER=0.001 Switching

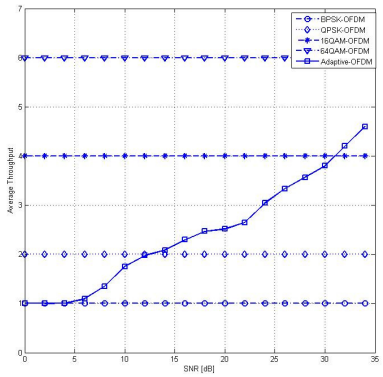

그림 5. 표1과 같은 기준 SNR일 때 데이터 처리량
Fig. 5 Throughput performance for adaptive OFDM under Table1 Switching

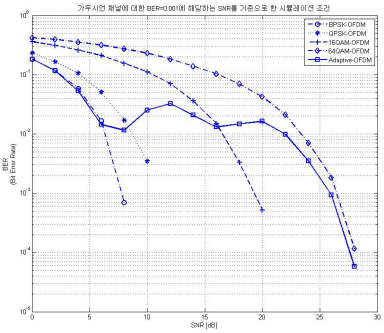

그림 6. 스위칭 기준 BER=0.001일 때 BER 성능
Fig. 6 BER performance for adaptive OFDM under BER=0.001 Switching

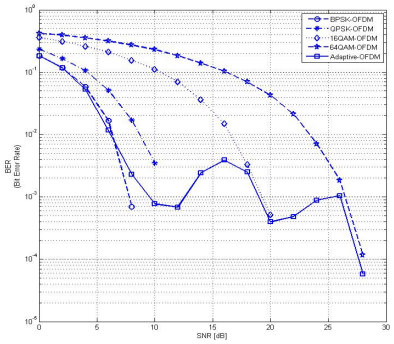

그림 6. 표1과 같은 기준 SNR일 때 BER 성능
Fig. 6 BER performance for adaptive OFDM under Table 1 Switching

수중 음향 통신에서 통신 서비스에 대한 품질을 개선하고자 하면 그림 6에서 정보 데이터의 처리량보다 BER 성능을 해당 통신 서비스를 기준이하로 유지하는 것이 바람직하다. 이를 위해서 BPSK에서 QPSK로의 모드 변경 SNR 임계치는 9~10[dB]정도이며 QPSK에서 16진 QAM으로의 모드 변경은 16~17[dB]정도, 16진 QAM에서 64진 QAM으로의 모드 변환은 대략 24~25[dB]정도가 적당하다는 것을 알 수 있다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서, 기존의 무선통신 채널에 비해 매우 복잡한 구조로 감쇠와 다중경로등이 발생하는 수중 음향채널에서의 통신을 위한 적응형 OFDM의 성능에 대해서 연구하였다. 이러한 채널의 상태가 좋지 못하는 환경에서의 적응형 OFDM 방식의 장점을 고정통신의 장점과 비교하였다. 더 좋은 적응 알고리즘은 데이터 처리량을 개선하는데 사용되었다. 이 알고리즘은 부채널 반송파들의 평균 순시 SNR를 부채널의 변조 모드를 스위칭하는데 사용하였다. 또한, 음향 통신에서의 서비스 품질을 나타내는 척도로 BER를 고려하여 BER 성능을 일정하게 할 경우, SNR의 스위칭 임계값을 얻었다. 그러나 더 좋은 BER 성능을 제공하기 위해서는 데이터 처리량이 다소 낮아지는 트레이드-오프가 발생하였다. 따라서 향후 좋은 BER 성능에 데이터 처리량을 개선하기 위한 오류정정부호의 효율적인 사용과 이에 대한 적응 알고리즘의 연구가 진행되어야 한다.

참고 문헌

[1] M. Chitre, S. H. Ong, and J. Potter, “"Performance of coded OFDM in very shallow water channels and snapping shrimp noise,”" in Proceedings of MTS/IEEE OCEANS, vol. 2, 2005, pp. 996-1001.

[2] P. J. Gendron, “"Orthogonal frequency division multiplexing with on-offkeying: Noncoherent performance bounds, receiver design and experimental results,”" U.S. Navy Journal of Underwater Acoustics, vol. 56, no. 2, pp. 267-300, Apr. 2006.

[3] M. Stojanovic, “"Low complexity OFDM detector for underwater channels,”" in Proc. of MTS/IEEE OCEANS conference, Boston, MA, Sept. 18-21, 2006.

[4] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, L. Freitag, and P. Willett, “"Multicarrier communication over underwater acoustic channels with nonuniform Doppler shifts,”" IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 33, no. 2, Apr. 2008.

[5] Yuri Labrador, Masoumeh Karimi , Deng Pan, and Jerry Miller, “Modulation and Error Correction in the Underwater Acoustic Communication Channel”, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.9 No.7, July 2009.

[6] K.M.Hadi, R.Tripathi and K.Kant, “Performance of Adaptive Modulation in Multipath Fading Channel” The 8th International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT, vol. 2, pp. 1277-1282, 20-22 February 2006.

[7] A.Cyzlwik, “Adaptive OFDM for wideband radio channels” Global Telecommunications Conference, vol 1, pp713-718, Nov 1996.

[8] P.S.Chow, J.M.Cioffi and J.A.C Bingham, “ practical discrete multitone transceiver loading algoritm for data transmission over spectrally shaped channels” IEEE Transactions Communications, vol 38, pp. 772-775, 1995.

[9] A.Omar. and A.R.Ali, "Adaptive channel characterization for wireless communication," IEEE Radio and Wireless Symposium, pp. 543-546, 22-24 Jan. 2008.

[10] A.Sohail and M.N.Jafri, “Adaptive OFDM over Frequency Selective and Fast Fading Channel Using Blockwise Bit Loading Algorithm” IEEE International Conferenece on Wireless and Optical Communication Networks,pp. 1-4, July 2007. 2004.

[11] Ram Pattarkine,“ High Rate OFDM Acoustic Link for Underwater Communication”, PVG’s College of engineering and Technology, 44, Vidyanagari, Parvati Darshan Pune India 411009.

저자 소개

임요웅(Yo-wung Im)

1996년 경희대학교 우주과학과 졸업(이학사)
2010년 (주)준영시스템 대표이사
2008.8 ~ 현재 연세대학교 공학대학원 통신방송공학과 석사과정
※ 주 관심분야 : 유무선 통신 시스템, 정보통신 기간망 네트워크

강희훈(Hee-hoon Kang)

1997년 2월 서울산업대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1999년 8월 광운대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
2003년 8월 광운대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
여주대학교 전자과 교수
* 안산시, 화성도시공사, 우정국조달사무소 설계자문위원,
* 한국건설교통기술평가원, 한국산업기술평가원 평가위원,
※ 주 관심분야 : 무선 네트워크 및 통신시스템, 센서네트워크통신