

OFDM 수중음향통신 신호처리 설계와 성능평가

김병철*, I-Tai Lu**

삼성전자 네트워크 사업부, 폴리테크닉 대학교 전자공학과

Design and Performance Evaluation of Signal Processing for OFDM Underwater Acoustic Communications

Byung-Chul Kim*, I-Tai Lu**

*TN Business, Samsung Electronics Co., Ltd., **Dept. of Electrical Eng., Polytechnic University

요약

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식의 수중음향 데이터 통신시스템에서 도플러 편이(Doppler Shift)와 도플러 확산(Doppler Spread)의 영향을 완화하여 주파수 효율을 향상시킬 수 있는 수신신호처리 방안을 설계하고 해상에서 송수신 된 시험 데이터의 BER 로써 성능을 평가한다. 도플러 편이를 OFDM 심볼에 추가된 Cyclic Prefix 와 상관계수법을 통해 추정하였으며 도플러 확산에 의해 시간에 따라 변화하는 채널을 Time-Frequency 축상에서 2×1D MMSE 방식으로 추정한다. 해상실험 결과, 8kHz ~ 11kHz 의 전송대역을 사용 할 때 복호 전 전송률 3098bps, 송수신 소자간 거리 7km, SNR 15dB 에서 약 1~3%의 BER 이 추정된다.

1 서론

수중에서 음파의 전달 특성은 고속 데이터 통신에 있어서 매우 적대적이다. 특히 다중경로의 넓은 지연 확산으로 인하여 전 후 심볼 간의 간섭이 발생되고 Frequency Selective Fading 으로 송신된 심볼들을 왜곡 시키므로 광대역 통신에 큰 장애가 된다.

채널의 시간적인 변화가 상대적으로 작아서 도플러 편이나 도플러 확산이 작을 때, 채널의 주파수 선택성은 다수의 협대역 반송파 (부반송파)를 동시에

송수신하는 FDM (Frequency Division Multiplexing)과 같은 전송방법으로 극복 할 수 있다. 이러한 방법으로 적절히 설계된 시스템에서 각각의 부반송파는 Frequency Selective Fading 대신 Flat Fading 을 겪게 되므로 다중경로가 존재하는 광대역 통신에서 좋은 성능을 얻을 수 있다.

일반적으로 OFDM 방식에서는 부반송파들 상호간에 직교성을 갖도록 주파수간격과 심볼 주기를 설정하여 좁은 대역폭 내에 많은 부반송파들을 동시에 전송 할 수 있어서 주파수 효율을 높일 수 있다.

그러나 수중음향 통신에서는 해상에 설치된 송수신소자의 끊임없는 움직임과 상대적으로 낮은 음파 전파속도 등으로 인해 무시 못할 정도의 도플러 편이와 도플러 확산이 발생되어 OFDM 적용 시 부반송파간의 직교성이 쉽게 무너지므로 그들의 간격을 줄여 주파수효율을 높이기가 매우 어렵다.

OFDM 을 이용한 수중음향통신의 시도 중 [1]~ [3]에서도 이러한 문제 때문에 부반송파간격을 최소값의 2~4 배가 되도록 설정하여 주파수효율을 높일 수가 없었다.

본 연구에서는 OFDM 을 사용하는 수중음향 통신 신호처리에 다음 두 가지 기법을 도입하여 부반송파 간격을 최소화하고 주파수 효율을 향상시킨다.

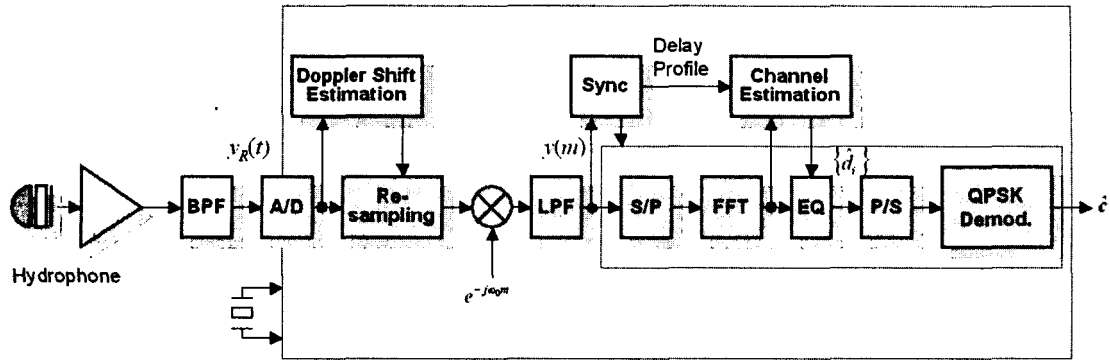


그림 1 OFDM 수중음향통신 수신신호처리 기능별 블록 구성도

- OFDM 심볼에 ISI 를 제거하기 위하여 추가되는 Cyclic Prefix 를 재활용하여 도플러 편이를 추정함으로써 이를 효과적이고도 효율적으로 보정한다[4].
- 주파수-시간 서브심볼 평면상에 2D pilot 을 배열하고 2×1D MMSE 채널추정기법[5]을 적용함으로써 Doppler 확산의 영향을 완화한다.

이와 같이 설계된 신호처리기법의 성능을 해상시험 데이터를 이용하여 제시한다.

2 OFDM 신호규격 및 신호 처리의 설계

OFDM 수중통신 수신 신호처리의 기능별 블록 구성도는 그림1과 같으며 송신 신호의 규격과 신호처리의 주요사양은 표1에 나타내었다.

표 1 OFDM 신호규격과 수신신호처리의 사양

데이터 형식	COFDM
주파수대역	8000-11000Hz
대역폭: B	3000 Hz
최대 도플러 확산: B_{Dmax}	1.0Hz at 11000Hz
최대 지연 확산: τ_{max}	92 ms
부반송파 수: N	768
부반송파 대역폭: $B_s = B/N$	3.90625 Hz
Guard Interval: $T_g (\tau_{max} \leq T_g)$	92 ms
심볼 길이: $T = 1/B_s$	256 ms
심볼 레이트: $R_s = 1/(T_g + T)$	2.885 symbols/sec
부반송파 당 비트 수: N_b	2 (QPSK Modulation)
등화방식	2×1D MMSE
파일럿 간격	주파수영역: $N_f=2, N_{mapf}=16$ 시간영역: $N_t=2, N_{mapT}=4$
파일럿 비율: $R_p = 1/(N_f \times N_t)$	1/4
Effective Data Rate: R	3098 bps (without coding)
주파수 효율: $\eta = R/B$	1.03 (without coding)

2.1 신호규격

OFDM 신호의 규격은 주어진 대역폭 및 채널의 특성에 따라 설계되는데, 대역폭은 3kHz 로 주어졌고, 음파 전달 특성 예측 프로그램을 통하여 최대 지연확산이 80ms~100ms, 최대 도플러 확산이 0.5~1.0Hz 정도임을 예측 할 수 있었다. 따라서 ISI 를 방지하기 위하여 Cyclic Prefix 의 길이를 최대 지연확산과 가까운 92ms로 하였다.

부반송파의 대역폭이 좁을 수록 채널의 주파수 선택성의 영향을 줄일 수 있고 Cyclic Prefix 에 의한 Overhead 를 줄여 전송효율을 높일 수 있지만, 한편으로는 도플러 확산의 영향을 크게 받아서 부반송파간의 간섭 (ICI)이 커진다. [4]의 시뮬레이션 결과에 따르면 $B_{Dmax}T$ 가 0.25 이상에서 성능이 크게 저하되므로 이를 넘지 않도록 부반송파 대역폭을 3.9Hz 로 하였고 그에 따라 심볼의 길이는 256ms 가 되었다.

2.2 수신신호처리

주요 수신신호처리는 그림 1 에서와 같이 A/D 변환 후 도플러 편이를 보상하고 FFT 를 이용하여 모든 부반송파를 동시에 demultiplexing 한 후 다중경로와 도플러 확산에 의한 각 부반송파의 위상변화를 보정하는 것이다.

OFDM symbol 에 추가된 Cyclic Prefix 는 동일 심볼 종단 파형 일부를 복사한 것이므로 수신신호에서 자기상관계수를 산출하여 침투치간의 시간간격 변화를 측정하고 그 값이 송신신호의 그것과 일치

하도록 Resampling (Sampling Rate Conversion) 하면 도플러 편이가 보상된다.

이 후 기저대역으로 복소 주파수 변환하고 연속된 두개의 파일럿 심볼을 이용하여 동기를 획득한다. 이와 동시에 샘플링 주파수를 48kHz(실수데이터)에서 4kHz(복소데이터)로 변환하고 1024 point FFT 를 이용하여 demultiplexing 한 후 3kHz 전송대역에 해당하는 768 개의 부반송파를 선택한다.

768 개의 부반송파에는 비통신용 및 파일럿을 포함한 채널 추정용 부반송파가 있어서 실제 데이터 전송에 사용되는 부반송파는 539 개이다.

파일럿 부반송파를 이용하여 주파수영역과 시간영역에 대하여 $2 \times 1D$ MMSE 방법으로 각 부반송파의 채널을 추정 할 수 있는 데, 주파수 영역 파일럿 부반송파의 간격 N_f 와 시간영역 파일럿 부반송파의 간격 N_t 는 샘플링 이론에 따라 각각 채널의 최대 지연확산 τ_{max} 및 최대 도플러 확산 B_{Dmax} 와 다음의 관계를 만족하여야 한다.

$$N_f < \frac{T}{\tau_{max}}, \quad N_t < \frac{1}{(T + T_g)B_{Dmax}}$$

여기서 T 는 심볼 길이이며 T_g 는 Cyclic Prefix 의 길이 이다. 따라서 $N_f = 2, N_t = 2$ 로 선택하였고 파일럿 율이 1/4 이 된다. MMSE 채널추정기의 탭수는 성능과 연산량을 절충하여 몇 차례의 실험을 통하여 설정하였는 데 주파수축에 대하여 $N_{tapF} = 16$, 시간축에 대하여 $N_{tapT} = 4$ 로 설정하였다.

3 시험 및 분석

3.1 시험개요

본 시험은 2000 년 5 월 23 일부터 25 일까지 미국 캘리포니아주 포인트 로마 서부 해상에서 수행되었는데 수신기는 수심 약 200m 바닥에 설치 되었으며 송신기는 수면으로부터 약 10~30m 수중에 설치되었다. 송신소자와 수신소자의 거리는 3km, 5km 그리고 7km 이었는데 본 논문에서는 7km 의 경우를 중심으로 나타낸다. 시험환경과 해상시험에 관한 상세한 내용은 [6]-[7]에 나타나 있다.

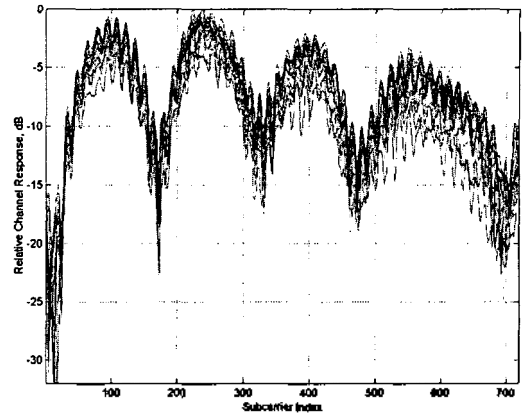


그림 2. 부반송파 별 채널 특성 추정치

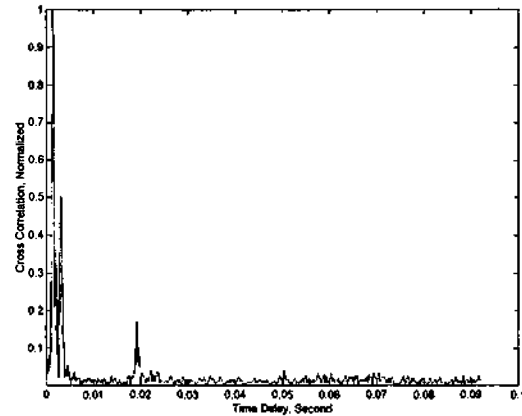


그림 3. 채널의 지연확산 특성 추정치

3.2 시험 결과

그림 2 는 18 개의 연속된 심볼에 대하여 추정된 각 부반송파별 채널 특성을 나타내고 있는데 채널의 심한 주파수 선택성을 잘 나타내고 있다. 그림 3 은 파일럿 심볼을 이용하여 추정한 채널의 지연 확산이다. 시험 전 예측과는 달리 최대 지연 확산은 20mS 정도로 비교적 작은 값으로 나타난다. 이 추정치는 MMSE 채널 추정기의 계수산출에 이용된다.

그림 4 에 등화 된 18 개 심볼에 대한 부심볼들의 constellation 을 나타내었는데, 9700 여개의 부심볼에 대하여 약 1.2%의 BER 을 보였다. 그림 5 에는 7km 거리에서 17 차례 시도한 시험의 비트 오류를 SNR 별로 나타내었다. 여기서 각 바트는 복호 전의 상태이므로 부호화 이득은 없다.

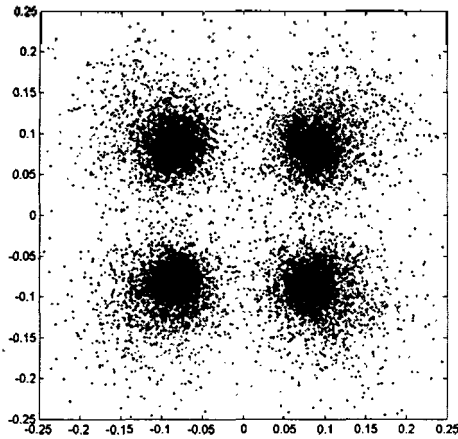


그림 4. 부심볼의 constellation: SNR=19dB, 거리 7 km

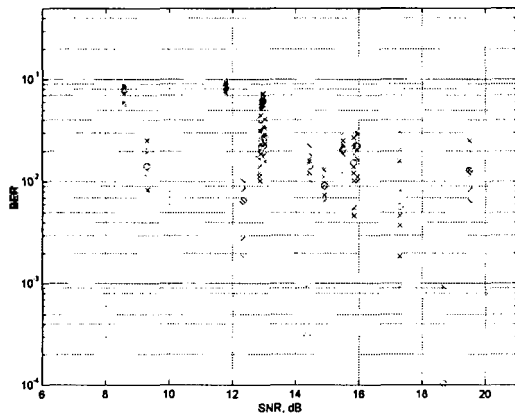


그림 5. SNR 에 따른 심볼 별 BER (7km): O 는 평균값

각 시험마다 18 개의 심볼이 송수신되었고 각 시험에서의 비트오류 평균값을 O 로 표시하였다.

4 결론

본 연구에서는 OFDM 을 이용한 수중 데이터 통신 신호처리를 설계하고 해상 시험 결과를 이용하여 BER 성능을 나타내었다. 도플러 편이와 확산에 의한 수신성능의 열화를 효과적으로 개선, 각 부반송파를 최소간격으로 설정하여 약 1bits/Herz 의 주파수효율을 얻었으며 약 200m 수심의 천해에서 7km 거리까지 복호 전 1%이하의 비트 오류를 얻을 수 있었다.

설계 시 예측된 음향환경과 실제 시험환경에서 최대 지연확산에 차이가 컸는데 이를 개선한다면 Cyclic

Prefix 의 길이를 줄이고 파일럿의 밀도를 낮추어 전송효율을 더욱 높일 수 있을 것으로 판단 된다.

참고문헌

- [1] S. Coatelan and A. Glavieux, "Design and test of a multicarrier transmission system on the shallow water acoustic channel," Proc. OCEANS'94, Brest, France, Sep. 1994, pp 472-477.
- [2] Elie Bejjani and Jean-Claude Belfiore, "Multi-carrier coherent communications for the underwater acoustic channel," Proc. OCEANS'96, Florida, Sep. 1996, pp1125-1130.
- [3] W. K. Lam and R. F. Ormondroyd, "A frequency domain adaptive coded decision feedback equalizer for a broadband UWA COFDM system," Proc. OCEANS'98, pp794-799.
- [4] Byung-Chul Kim and I-Tai Lu, "Parameter studies of OFDM underwater communications systems," in Proc. MTS/IEEE Oceans 2000, vol.2 pp. 1251-1255, Sept. 2000.
- [5] Peter Hoeher, et al., "Two-dimensional pilot-symbol-aided channel estimation by wiener filtering," in Proc. IEEE ICASSP '97, vol. 3, pp. 1845-1848, April 1997.
- [6] Michael B. Porter, et al., "SignalEx: linking environmental acoustics with the signaling schemes," Proc. MTS/IEEE OCEANS 2000, vol.1, pp. 595 -600, September 2000.
- [7] J. Rice, et al., "Evolution of Seaweb underwater acoustic networking," Proc. MTS/IEEE OCEANS 2000, vol.3, pp. 2007 -2017, September 2000.