

PLL을 갖는 수중통신용 QPSK 수신기

김승근, 최영철, 김시문, 이덕환, 박종원, 임용곤
한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

QPSK Receiver with PLL for Underwater Communications

Seung-Geun Kim, Youngchol Choi, Sea-Moon Kim, Deok-Hwan Lee, Jongwon Park, and
Young-Kon Lim

Ocean Development System Laboratory, KRISO, KORDI, Daejeon, Rep. of Korea

E-mail : sgkim@kriso.re.kr

요 약

본 논문에서는 수중 초음파 통신용 QPSK 버스트 수신기의 구현에 대해서 논한다. 구현된 시스템은 반송주파수 25kHz를 사용하고, 심벌율은 5kHz이며, 송신에서 D/A변환을 위해 200kHz로 샘플링하고, 수신기에서는 A/D변환을 위해 100kHz를 사용한다. 구현된 수신기에서는 32심벌 길이의 preamble을 이용하여 프레임 동기를 찾음과 동시에 개략적인 심벌시간 동기와 위상편이를 추정한다. 추정된 위상편이값은 2차 PLL(phase-locked loop)의 초기값으로 사용한다. 실험역 전송 시험 데이터를 통하여 조류의 변화에 의해 발생하는 Doppler 편이를 보상하기 위하여 PLL이 필수적으로 필요함을 보인다.

Abstract

In this paper, we represent an implementation of burst QPSK receiver for underwater acoustic communication. Transmitter sends 5,000 symbols at 25kHz frequency with 200 kHz D/A sampling rate. The received signal is sampled at 100 kHz. Implemented receiver acquires the frame synchronization, coarse symbol timing estimate, and coarse phase offset estimate using 32 symbol length preamble. The estimated phase offset is used to initiate of 2nd order PLL. The transmission experiment results show that PLL is a mandatory to compensate Doppler shift due to the variation of tidal current.

키워드

Digital Receiver, PLL, QPSK, burst

1. 서 론

공기중에서의 무선통신은 전파를 이용하여 정보를 전송하는 것에 반하여 수중에서의 무선 통신은 초음파를 이용하여 정보를 전송한다. 실제 시스템의 송신기와 수신기의 발진기 주파수가 서로 정확히 일치하지 않아 발생하는 주파수 편이로 인한 수신 신호 위상의 시간에 따른 변화와 송수신기의 이동 및 해류 변화에 의한 영향으로 발생하는 도플러(Doppler) 효과 때문에 수중에서 위상동기를 얻기 어려워 FSK와 같은 비위상동기방식이 주로 사용되었으나, 미국의 Woods Hole 해양연구소에서 동기 전송방식을 실험한 이후 대역폭 효율을 높일 수 있

는 PSK와 같은 동기위상전송방식에 대한 연구자들의 관심이 집중되었다[1].

현재 동기위상방식을 사용하는 시스템은 200-20,000 bps사이의 전송율과 0.06-50 km 정도의 사용범위에서 제작되었으며, 시스템의 복잡도를 낮추는 동시에 시스템의 성능향상을 위한 연구가 진행중에 있다 [1]. 이러한 연구의 일환으로 한국해양연구원에서는 DSP시스템을 이용하여 10,000 bps의 전송속도를 갖는 QPSK 송수신 시스템을 제작하였다[2]. 이 시스템은 증폭기와 센서를 제외한 모든 시스템을 병렬 DSP를 이용하여 구현하였으며 프레임 동기화기, 디지털 변복조기, 적응 등화기, 빔성형기, 길쌈부호화기, Viterbi 복호기, interleaver/

deinterleaver등의 알고리즘을 포함한다. 이 시스템은 국내 최초 디지털 수중 통신 시스템으로서 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 보유하고 있는 무항수조에서 실험을 통하여 시스템의 성능이 검증하였다[2]. 혼련신호를 위상편이값을 한번 추정하여 이를 한 프레임에 걸쳐 동일하게 적용하여 위상편이를 보상하는 방법을 이용하는 구현 시스템은 무항수조에서 실험시에는 매우 안정적인 환경에서 실험을 수행하였기 때문에 시스템 알고리즘들이 아무런 문제없이 잘 동작하였으나, 실험역 실험에서는 해류의 변화에 의한 도플러효과가 발생하여 수신 신호의 위상이 회전하여 수신기 알고리즘들이 제대로 동작하지 않는 문제점이 있었다. 본 논문에서는 해류에 의해 발생하는 도플러효과로 인한 수신 위상의 변화 문제를 해결하여 수신기 알고리즘들이 잘 동작하기 위한 방안에 대하여 논한다. 또한, 구현한 위상동기 전송방식을 사용하는 QPSK 전송 시스템을 실험역에서 실험한 데이터를 고찰한다.

II. 수신 시스템

2.1 프레임 구조

전송 데이터의 프레임 형식은 그림 1에 나타낸 것과 같다. 램프업 심벌로 7심벌을 두고 16심벌 길이의 CAZAC 신호열을 두 번 반복하여 32 심벌 길이를 갖는 CAZAC 신호열을 갖고 채널 등화기를 위하여 150심벌의 혼련신호열과 남은 프레임 지속 시간동안 임의의 QPSK 심벌들로 채워지며 프레임의 마지막은 7심벌로 이루어진 램프다운 심벌로 구성된다. 16심벌 길이의 CAZAC 신호열을 표 1에 나타내었다.

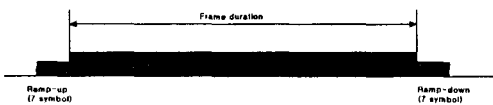


그림 4. 프레임 구조

표 2. 16 심벌 CAZAC 신호열

심벌 No.	I 채널	Q채널	심벌 No.	I 채널	Q 채널
1	0	0	9	0	0
2	1	0	10	0	1
3	1	1	11	1	1
4	0	1	12	1	0
5	0	0	13	0	0
6	1	1	14	0	0
7	0	0	15	0	0
8	1	1	16	0	0

2.2 수신기 구조

초음파를 이용한 QPSK 수신기를 디지털 영역에서 구현하였을 경우의 수신기 기능 블록도가 그림 2에 있다. 수중채널부터 ADC까지는 아날로그 영역에서 신호처리가 이루어지고 ADC이후부터는 디지털 영역에서 신호처리가 이루어진다. 구현된 QPSK 전송 시스템은 반송주파수 25kHz를 사용하고, 심벌율은 5kHz이며, 수신에서 D/A변환을 위해 200kHz로 샘플링하고, 수신기에서는 A/D변환을 위해 100kHz를 사용한다. 수신 신호의 샘플링은 free running형식의 오실레이터를 이용하여 샘플링을 수행하고, 수신단에서 다운컨버팅과 저주파필터링을 하여 기저대역 신호로 바꾼다. 저주파 필터링한 수신 샘플에 송신 신호가 포함되어 있는지 여부를 판단하기 위한 버스트 검출기와 버스트 검출의 문턱값을 제공하기 위한 배경잡음전력 추정기를 두었다. (버스트 검출기와 배경잡음전력 추정기에 대하여 보다 자세한 사항을 알고 싶은 독자는 논문 [3]을 참고하기 바란다.) 버스트 검출기에서 신호 검출이 이루어진 경우에만 다음 단으로 신호샘플을 보내 디지털 신호처리를 수행하고, 그렇지 않은 경우에는 수신 데이터를 삭제한다. 버스트 검출기에서 미리 알려진 preamble을 이용하여 프레임 동기를 맞추고 동시에 개략적인 심벌시간 동기화 및 위상편이를 추정한다. 추정된 심벌시간은 decimation을 수행함에 있어 기준이 되며 동시에 해당 프레임에서의 심벌 시간이 되고, 추정된 위상편이는 PLL (phase-locked loop)의 초기값으로 사용된다. 버스트 검출기에서 버스트검출이 이루어진 경우 데이터를 후단으로 보낸다.

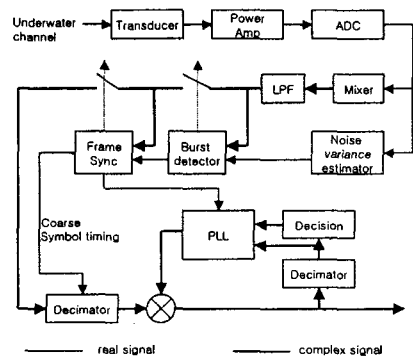


그림 5. 초음파를 이용한 QPSK 수신기 기능 블록도

수신기에서 심벌당 20샘플을 취하여 샘플간 시간간격이 충분히 작기 때문에 수신기 내부에서 심벌시간 편이 추정 및 복원이 필요 없이 수신 샘플 중 심벌시간이라고 추정되는 샘플을 선택함으로써 심벌시간 복원이 되는 것으로 생각할 수 있다. 채널복호기 및 PLL을 위한 신호 결정에 필요한 샘플은 심벌당 한 샘플이면 되지만 채널 등화기와 같은

복조 이후의 디지털 신호 처리를 위해 심벌당 4개의 샘플을 등간격으로 후단에 넘긴다. 즉, 심벌시간이라고 추정된 샘플부터 시작하여 5개의 샘플간격으로 하나씩 다음 단으로 보내지고, 보내진 샘플들은 PLL에서 추정된 위상편이만큼 위상을 보상한다.

2.3 저역통과필터

샘플링주파수는 반송주파수의 4배이고, 반송주파수는 기저대역폭의 5배이므로 한 심벌당 20샘플을 취한다. 이 샘플신호에 $\exp(-j\pi nT/2)$ 신호열을 곱하여 반송주파수대역에 있는 신호를 기저대역신호와 2배의 반송주파수대역 신호로 각각 이동시킨다. 저역통과필터는 디지털 믹서이후 고주파성분과 ADC에서 발생하는 DC 바이어스를 제거할 수 있어야 하므로 믹싱된 신호에서 2배의 반송주파수 대역의 신호를 제거하기 위하여 $z=-1$ 에 영점을 갖고, ADC에서 발생하는 DC 바이어스를 제거하기 위하여 $z=1$ 에 영점이 필요하다. 또한, 저주파 통과 필터는 선형 위상 합수가 되어야 하고, 홀수 탭수를 갖게 설계하여야 한다. 이를 만족하는 저주파 통과 필터의 계수값은 [1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2]이다. 수신기에서 이와 같은 간단한 저역통과 필터를 사용함으로써 필터링을 위해 사용하는 곱셈을 간략화할 수 있어 보다 고속의 데이터 처리를 할 수 있고, 추후 ASIC 설계에 있어서도 곱셈기 없이 덧셈기와 shifter로만 LPF를 구현할 수 있기 때문에 설계복잡도를 현격히 줄일 수 있어 시스템 동작시 전력소모를 작게하여 수중전송 시스템의 동작시간을 증가시킬 수 있는 장점이 있다.

2.4 프레임 동기

LPF 출력을 한 심벌당 20배 과샘플되며 프레임 동기 검출을 위해 프레임블록 중 16 심벌을 사용하여 프레임동기를 검출한다. 과샘플 신호열에서 20샘플만큼씩 (한심벌 간격) 떨어진 연속한 16개의 심벌들을 취하여 이를 프리앰플 심벌의 공역복소수와 곱한 후 더하여 이의 에너지를 계산하여 우리가 원하는 문턱값과 비교하여 문턱값보다 크면 프레임 동기가 그 순간 맞은 것으로 결정하고, 그렇지 않은 경우는 프레임 동기가 맞지 않은 것으로 결정한다. 본 논문에서 고려하는 수신기는 위상동기가 프레임동기 이후에 이루어지는 구조를 갖는 수신기이기 때문에 상호상관의 에너지를 구하여 프레임 동기를 결정한다. 문턱값 결정에는 수신신호의 크기에 비례하는 값으로 설정한다. 수신신호의 크기를 결정하기 위하여 버스트 검출기의 연산에 사용되는 수신 신호크기를 이용한다. 프레임 동기 결정시 연속된 샘플구간에서 상호상관의 에너지가 문턱값보다 크면, 그중 제일큰 값을 갖는 샘플의 지수값을 심벌시간으로 설정하고, 그때의 상호상관값의 위상을 위상편이 값으로 추정한다.

심벌시간 샘플부터 등간격으로 5 샘플만큼 떨어진 샘플들만을 다음 단으로 디지털 신호처리를 수행한다. 프레임 동기이후에 과샘플율이 4배로 줄기 때문에 신호처리에 필요한 시간을 확보할 수 있고, 데이터 처리량이 줄어들므로 인하여 전력소모를 줄일 수 있는 장점이 있다.

2.5 2차 Phase-Locked Loop

2차 PLL은 위상편이와 주파수 편이를 추적하여 수신 신호의 위상변화를 추적할 수 있는 기능을 가지고 있다. PLL의 오차값은 심벌시간에 해당하는 샘플과 이 샘플을 이용하여 전송 데이터를 판단한 값의 공역복소수를 복소 공간상에서 곱한 결과의 허수부값이다. 그러므로, 한 심벌당 하나의 오차값만 생성되지만, decimator의 출력은 심벌당 4샘플이 되기 때문에 PLL에서도 한 심벌당 4번의 위상값 갱신이 필요하다. 매 위상 갱신시 마다 위상오차값을 생성할 수 없으므로 심벌당 한번 생성한 오차값을 4번 연속으로 PLL갱신을 위한 오차값으로 사용한다. 보다 자세한 PLL에 대한 설명은 문헌 [4]를 참고하기 바란다. 2차 PLL을 이용하여 조류의 변화에 의해 발생하는 Doppler 편이 및 송신기와 수신기의 지역 발진기의 발진주파수 차로 인해 발생하는 위상변화를 추적하여 이를 보상한다.

III. 실험실

해양연구원에서 SHARK DSP 시스템을 이용하여 구현한 수중초음파통신 시스템의 실험실 전송 성능검증을 위하여 2003년 8월 강원도 고성 앞바다에서 강원대의 실험선을 빌려 실험실 전송 실험을 수행하였다. 실험방법은 미리 생성한 초파대역폭이 0.5인 2초 길이의 프레임을 반복적으로 계속 보내고 데이터를 송신기에서 보내고 데이터 취득 보드를 통하여 수신 데이터를 취득하여 후처리과정을 거쳐 실험을 하였다. 실험에 사용된 장비는 B&K Type 2692 O14 NEXUS 증폭기, B&K Type 4229 Hydrophone Calibrator, B&K Type 8103 Hydrophone등이 사용되었고 전송거리는 약 5m이고 전송 깊이는 약 3m이다.

그림 3에 수신신호의 전체적인 형상과 그림 4에 수신 신호의 일부분을 확대하여 다시 그린 것이다. 그림 3에서 보면 실험도중 배의 엔진을 정지하지 않았기 때문에 배의 엔진에서 일어나는 진동에 의해 매우 큰 에너지를 갖는 저주파 파형이 생성됨을 볼 수 있다. 그림 4에는 그림 3의 수신 신호의 일부분을 확대한 것으로 고주파수의 전송신호가 있음을 볼 수 있다. 그러므로, 수중통신 실험시 저주파성분을 제거하는 BPF나 HPF를 설치하여 배의 엔진 등에서 발생하는 잡음을 효과적으로 제거하기 위한 아날로그 필터를 수중음향센서와 전력증폭기 사이에 삽입하여야 할 것이다.

그림 5에 preamble을 이용하여 위상편이추정을

하여 프레임동안 위상편이보상을 하는 경우 심벌 시간 샘플의 수신 신호를 나타낸 것이고, 그림 6은 preamble을 이용하여 위상편이추정 및 2차 PLL을 이용하여 해류에 의해 발생하는 도플러 편이를 보상하는 경우 심벌시간 샘플의 수신 신호를 나타낸 것이다. 그림 5와 6에서 보듯이 PLL을 설치하여 도플러 편이를 보상해야만 QPSK신호가 제대로 수신됨을 볼 수 있다.

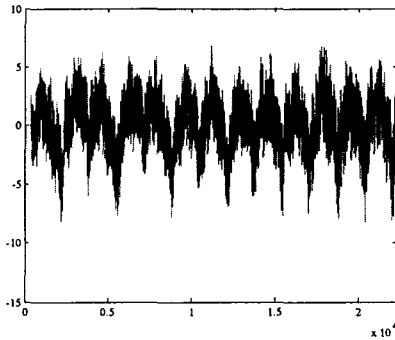


그림 6. 수신신호

IV. 결론

해양연구원에서 구현한 반송주파수 25kHz를 사용하고, 심벌율은 5kHz인 QPSK 전송 시스템에 대하여 논하고, 실험역 실험 테이터를 예시하였다. 구현된 수신기에는 100kHz 샘플링을 하고, 다운컨버팅과 저주파필터링을 하여 기저대역 신호로 바꾼 후 프레임 동기 검출과 동시에 심벌시간을 결정하고 위상편이를 계산한다. 계산된 위상편이값을 2차 PLL의 초기값으로 사용하고, 계속 위상추적을 함으로써 실험역의 해류에 의해 발생하는 도플러 편이를 보상할 수 있었다. 수중통신 시스템에서는 해류의 영향을 항상 받기 때문에 프레임의 길이가 매우 짧지 않는 시스템 설계시 도플러 편이를 고려하여야만 원하는 성능의 시스템을 설계할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부, 한국해양연구원 및 과학기술부 국가지정연구실사업의 재정적 지원을 받아 수행된 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] D. Kilfoyle and A. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry,"

IEEE J. of Oceanic Eng., Vol. 25, no. 1, pp. 4-27, Jan. 2000.

- [2] 임용곤 외, 초음파를 이용한 수중 영상정보 전송기술개발, 한국해양연구원 보고서, 2002. 10.
- [3] 김승근 외, "초음파를 이용한 수중 영상 버스트 전송 시스템을 위한 새로운 프레임 동기방안," 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 336-340, 2003. 5.
- [4] U. Mengali and A. D'Andrea, Synchronization Techniques for Digital Receivers, Chap. 5, Plenum Press, 1997.

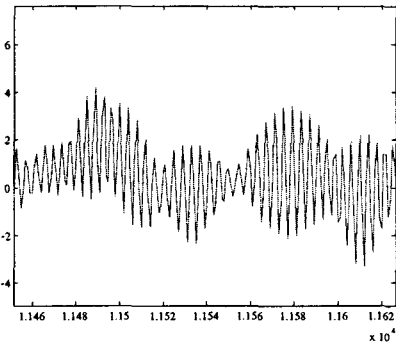


그림 7. 수신 신호 일부 확대

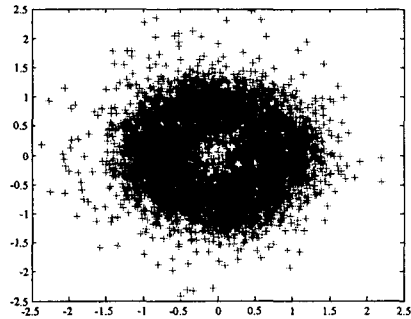


그림 8. PLL이 없는 경우

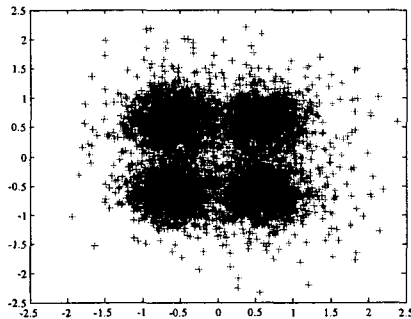


그림 9. 2차 PLL이 있는 경우