

## 수중 센서 노드를 위한 음파 대역 인터폴레이터 설계\*

김 선 희\*\*

### *Design of an Acoustic band Interpolator for Underwater Sensor Nodes*

Kim Sunhee

#### 〈Abstract〉

Research on underwater sensor networks is increasing due to such reasons as marine resource management, maritime disaster prediction and military protection. Many underwater sensor networks performs wireless communication using an acoustic sound wave band signal having a relatively low frequency. So the digital part of their modem can take charge of carrier band signal processing. To enable this, the sampling rate of the baseband band signal should be increased to a sampling rate at which carrier band signal processing is possible. In this paper, we designed a sampling rate increasing circuit based on a CIC interpolator for underwater sensor nodes. The CIC interpolator has a simple circuit structure. However, since the CIC interpolator has a large attenuation of the pass band and a wide transition band, an inverse sinc LPF is added to compensate for frequency response of the CIC interpolator. The proposed interpolator was verified in time domain and frequency domain using ModelSim and Matlab.

Key Words : Acoustic Band Communication, CIC filter, Interpolator, Underwater Sensor Network, Underwater Wireless Communication

## 1. 서론

해저 탐사에 이어 해양에서의 무선 센서 네트워크에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. 해저의 모양, 지층 탐사 등 뿐 아니라 계속 변화하는 해양의 온도, 염분 등 해양의 자연 환경을 모니터링하고, 해양 재난 대비 및 군사적 방어 체계 구축 등 해양 산업

의 중요성이 증가하였기 때문이다[4]. 유럽 연합의 '썬라이즈 프로젝트'나 캐나다의 '오션 네트워크 캐나다'의 시스템이 해양 무선 네트워크 연구의 대표적인 예이다[5]. 국내에서는 선박해양플랜트 연구소, 호서대학교, 강릉원주대학교 등에서 수중 통신에 대한 연구가 진행되고 있다[6].

일반적으로 육상, 즉 공기 중에서 무선 센서 네트워크를 구성할 때는 전자기파를 이용한다[7, 8]. 그러나, 물에서의 에너지 전달은 공기 중에서의 에너지 전달보다 거리에 따른 감쇠가 심하다. 따라서 해양에

\* 본 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(분산형 수중관측 제어망 개발)

\*\* 상명대학교 시스템반도체공학과 조교수

서는 육상과 달리 전자기파보다 주파수가 낮은, 즉 투과력이 높은 음파를 사용하여 무선 통신 센서 네트워크를 구성한다[9].

수중 통신에서 사용하는 음파는 약 200 kHz 이하이므로 수중 통신 모델 설계시 음파를 송수신하는 트랜스듀서와 통과 대역 필터, 그리고 ADC/DAC 제외하고는 대부분 디지털 시스템으로 구현한다. 또한, 속도가 빠르지 않으므로 DSP를 기반으로 소프트웨어로 설계하는 경우가 많다[2, 10].

호서대학교를 중심으로 한 연구단에서는 100 kHz 이하의 음파를 사용하여 '분산형 수중 관측 제어망'을 연구하고 있다[11]. OFDM과 CDMA 방식을 병행하여 연구 중이며, DSP에서 상의 소프트웨어가 아닌 모델 전용 칩을 개발하고 있다. 본 연구에서는 분산형 수중 관측 제어망의 수중 센서 노드 송신단을 위한 인터플레이터(interpolator)를 설계하였다. 2장에서 수중 센서 노드를 위한 인터플레이터 조건 및 구조를 소개하고 3장에서 하드웨어 설계 결과를 설명하겠다. 그 다음에 결론을 서술하겠다.

## II. 수중 센서 노드용 인터플레이터

### 2.1 분산형 수중 관측 제어망

분산형 수중 관측 제어망은 해상 부이, 수중 기지국(Underwater BaseStation, UBS), 그리고 수중 센서 노드(Underwater Sensor Node, USN)로 통신망을 구성한다. 수중 센서 노드는 수중 환경에서 수온, 염분 등을 측정하여 수중 제어국으로 전달한다. 수중에 있는 수중 제어국은 수중 센서 노드들로부터 수집된 수중 정보를 해상에 떠 있는 해상 부이로 전달하고, 해상 부이는 육상망을 이용하여 관측 센터에 전달하게 된다. 해상 부이와 수중 기지국은 3 ~ 20 kHz 대역과

60 ~ 70 kHz 대역을 이용하며, 수중 기지국과 수중 센서 노드는 22 ~ 58 kHz 대역을 이용한다.

<표 1>에는 수중 기지국과 수중 센서 노드 간의 통신 채널에 대해 요약되어 있다. <표 1>에서 보는 바와 같이, 수중 기지국에서 수중 센서 노드로 데이터를 전송하는 링크(downlink)는 1개가 있고, 수중 센서 노드에서 수중 기지국으로 데이터를 전송하는 링크는 4개가 있다. 주파수가 낮을수록 음파의 투과력이 좋기 때문에 장거리 통신이 가능하다. 따라서 수중 센서 노드는 수중 기지국을 중심으로 거리에 따라 4개의 그룹으로 분류하여 통신망을 구축한다.

<표 1> 수중 기지국과 수중 센서 노드 간의 통신 채널에 대한 요약

	반송파 주파수 (kHz)	대역폭 (kHz)	채널 간격 (kHz)
하향링크	24.5	5	3
상향링크 0	32	4	2
상향링크 1	38	4	2
상향링크 2	44	4	2
상향링크 3	53	10	2

### 2.2 인터플레이터 구조 및 특성

수중 센서 노드의 송신부는 데이터를 베이스밴드 대역 처리 후 반송파 대역으로 신호를 옮긴 뒤 반송파 대역 통과 대역 필터를 거쳐 ADC로 전달한다. 즉, 디지털 회로에서 반송파 대역 통과 대역 필터링을 수행하기 때문에, <표 2>와 같이, 디지털 회로의 최종 신호는 반송파 주파수의 약 10배인 500 kHz로 샘플링 되었다. 베이스밴드에서는 상향 링크 0 ~ 2인 경우에는 5 kHz, 상향 링크 3인 경우에는 10 kHz로 데이터를 처리한다. 따라서 베이스밴드 대역 신호 처리 후 데이터의 샘플링 레이트를 변환시켜야 한다.

<표 2> 수중센서노드의 링크별 샘플링 레이트 증가 비율

	베이스밴드에서의 데이터 처리 속도	ADC에서의 샘플링 레이트	샘플링 레이트 증가 비율
상향링크 0	5 kHz	500 kHz	100
상향링크 1	5 kHz	500 kHz	100
상향링크 2	5 kHz	500 kHz	100
상향링크 3	10 kHz	500 kHz	50

일반적으로 데이터의 샘플링 레이트를 높이는 인터폴레이터는 연속된 데이터 사이에 증가시키려는 비율만큼 '0'을 추가한다. 이 과정에서 데이터 신호에 대한 이미지 성분이 발생하기 때문에 필터링을 통하여 반복되는 고주파 성분을 제거한다.

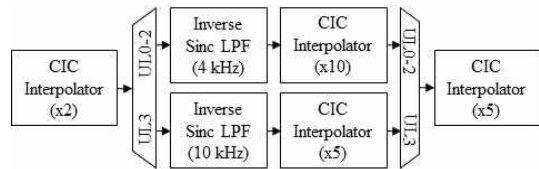
기존에 발표하였던 논문[12, 13]에서는 분산형 수중 관측 제어망 중 해상 부이와 수중 기지국 간의 통신 모델을 위한 인터폴레이터를 설계하였다. 논문 [12]에서는 Cascaded Integrator - Comb (CIC) 인터폴레이터를 이용하여 샘플링 레이트를 높였다. CIC 인터폴레이터는 '0' 삽입으로 데이터 레이트를 높이면서 동시에 저주파 대역 통과 필터로서의 역할을 한다. 필터 계수가 '1'로만 구성되어 다른 필터들과 달리 곱셈기를 필요로 하지 않기 때문에 크기가 작다는 장점이 있다. 하지만 CIC 인터폴레이터는 통과 대역의 감쇠가 크고 전이 대역의 폭이 넓다. 그래서 논문 [13]에서는 128-tap compensation filter를 추가하여 통과 대역의 감쇠를 보완하고, 다시 94-tap half-band filter를 추가하여 전이 대역의 폭을 줄였다. 이는 CIC 필터의 주파수 응답 특성을 개선하였지만, 크기가 상당히 증가하였다. 본 논문에서는 CIC 인터폴레이터를 이용하면서 compensation filter와 half-band filter의 기능을 동시에 수행할 수 있는 필터를 추가하여 CIC 인터폴레이터를 장점점을 살리면서 주파수 특성을 개선하고자 한다.

<그림 1>은 제안하는 수중 센서 노드를 위한 CIC 인터폴레이터의 구조이다. CIC 필터는 주파수 대역

에서 다음 식과 같은 크기 응답을 갖는다 [14].

$$|H(f)| = \left| \frac{\sin \pi f}{\sin \frac{\pi f}{R}} \right|^N \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 인터폴레이터 입력 데이터의 샘플링 레이트에 대한 상대적인 크기이고,  $R$ 은 증가시키려는 샘플링 레이트 비율, 그리고  $N$ 은 Integrator와 Comb 필터의 단수를 의미한다. 이 식에서 알 수 있는 것처럼 CIC 인터폴레이터는 입력 데이터의 샘플링 레이트 지점에서 크기가 급격히 감쇠하는데, 본 수중 센서 노드에서는 입력 데이터의 샘플링 레이트의 1/2 지점에 저지 대역이 존재해야 한다. 따라서 앞서 설명한 바와 같이 주파수 응답 특성을 보완해줄 수 있는 필터가 필요하다.



<그림 1> 수중 센서 노드를 위한 CIC 인터폴레이터의 블록도

<그림 1>과 같이 한 번에 샘플링 레이트를 변경하지 않고 단계를 나누어, 그 사이에 주파수 응답 특성을 보완해줄 수 있는 필터를 추가하였다. 한 번에 샘플링 레이트를 올리면, 이를 보완해주어야 하는 필터는 전체 인터폴레이터의 동작 영역 중 가장 높은 샘플링 레이트로 동작해야 하므로 파워 소모가 크기 때문이다. 가능한 추가되는 필터의 동작 샘플링 레이트를 낮추기 위하여 첫 번째 CIC 인터폴레이터의 샘플링 레이트 증가 비율을 2배로 설계하였다.

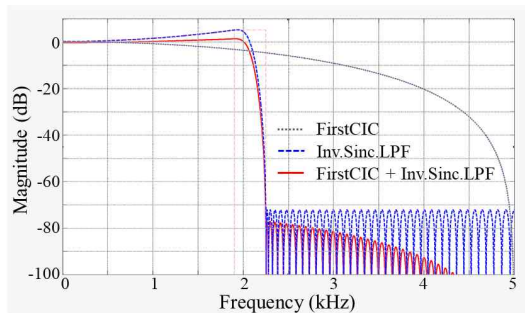
<표2>에서 설명한 바와 같이 상향 링크 0 ~ 2는 총 100배, 상향 링크 3은 총 50배를 증가시켜야 하

로, 각각에 대하여 샘플링 레이트를 다시 50배와 25배씩 증가시켰다. 이 때 두 번째 CIC 인터폴레이터의 샘플링 레이트 증가 비율을 각각 10배와 5배로 설계하고, 마지막에 공통적으로 5배를 높여주었다. 여기서 샘플링 레이트를 나누어 올림으로써, 샘플링 레이트를 5배 증가시키는 인터폴레이터는 첫 번째 인터폴레이터와 마찬가지로 모든 상향 링크에 대하여 공통적으로 사용이 가능하다. 즉, 전체적인 인터폴레이터의 크기를 감소시킬 수 있다.

세 개의 인터폴레이터를 거치지만, 첫 번째 인터폴레이터의 통과 대역 및 전이 대역 특성에 의하여 데이터의 왜곡이 가장 큰 영향을 받으므로[13] 첫 번째 CIC 인터폴레이터에 대한 보완 필터만 추가하였다.

CIC 인터폴레이터의 주파수 대역 특성을 보완하기 위하여 129-tap inverse sinc LPF를 설계하였다. 상향 링크 0 ~ 2는 data bandwidth가 4 kHz 이고, 상향 링크 3은 10 kHz이기 때문에 2개의 inverse sinc LPF가 필요하다.

<그림 2>는 data bandwidth가 4 kHz 일 때, 첫 번째 CIC 인터폴레이터와 inverse sinc LPF의 주파수 응답 특성을 보여준다. 첫 번째 CIC 인터폴레이터는 2 kHz에서 약 -3.7 dB 감쇠하고 3 kHz에서는 약 -9.2 dB 감쇠되어 있다. inverse sinc LPF는 2 kHz에서 약



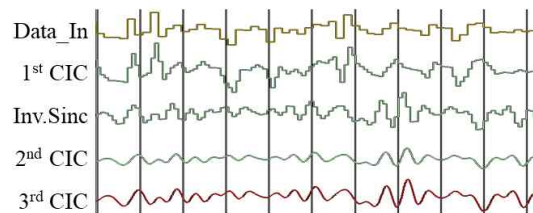
<그림 2> 주파수 특성 비교: 첫 번째 CIC 인터폴레이터의 주파수 특성, Inverse Sinc LPF의 주파수 특성, 그리고 두 필터를 연결하였을 때의 주파수 특성

4.2 dB 증대되어 있고, 2.25 kHz 이상에서는 약 -70 dB를 나타낸다. 이 두 개의 필터를 연결하였을 때의 주파수 특성을 보면, 2 kHz에서 약 0.5 dB로 통과 대역의 감쇠 현상이 제거 되었다. 그리고, 2.25 kHz 이상에서는 약 -77 dB 이하가 되어 전이 대역이 좁으며 감쇠가 충분히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

### III. 설계 및 결과

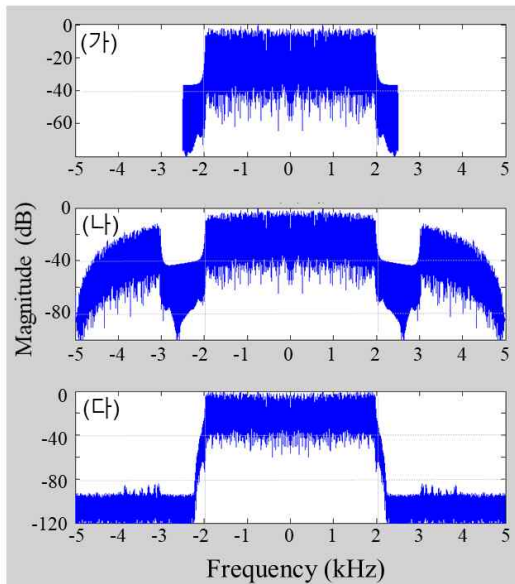
Matlab으로 수중 센서용 인터폴레이터에 대한 알고리즘 검증을 마친 뒤, Verilog HDL을 이용하여 디지털 하드웨어를 설계하였다. 데이터는 16 비트로 설정하였다. 각 필터 내부에서는 계산에 따라 계속 비트 확장을 하였으며, 최종 출력에서 필터의 게인 (gain)을 고려하여 신호를 다시 16비트로 조정하여 출력하였다.

<그림 3>은 기능 검증을 위하여 ModelSim에서 시뮬레이션을 한 결과 파형이다. 제일 위에서부터 입력 데이터 신호, 첫 번째 인터폴레이터의 출력 데이터 신호, inverse sinc LPF의 출력 데이터 신호, 두 번째 인터폴레이터의 출력 데이터 신호, 그리고 마지막 인터폴레이터의 출력 데이터 신호이다. 입력 데이터 신호의 샘플링 레이트가 높아짐에 따라 신호가 점점 부드럽게 변화하며 고주파 성분이 제거되었음을 확인할 수 있다.



<그림 3> Verilog-HDL 로 설계된 모듈의 ModelSim에서의 시뮬레이션 결과 파형 (시간 영역)

<그림 4>는 설계한 Verilog HDL 모듈에 대하여 상향 링크 0으로 설정한 뒤, 베이스밴드 신호 처리가 끝난 데이터 신호를 입력하여 단계별 획득된 출력 신호를 주파수 대역으로 변환한 결과이다. <그림 4>(가)의 첫 번째 주파수 응답 그래프는 입력 데이터의 주파수 응답으로 샘플링 레이트가 5 kHz이고 데이터 대역폭은 4 kHz이다. 샘플링 레이트를 2배 올린, 첫 번째 CIC 인터폴레이터의 출력 신호의 주파수 응답 그래프는 <그림 4>(나)에 있다. 이 그래프를 보면, 2 ~ 5 kHz 대역에 입력 데이터 신호의 이미지 성분이 발생하였음을 알 수 있다. 다시 inverse sinc LPF를 통과하면 <그림 4>(다)와 같이 2 kHz 이상의 주파수에서 신호가 제거되었음을 확인할 수 있다. 따라서 Verilog HDL로 설계한 인터폴레이터가 시간 영역과 주파수 영역에서 모두 정상적으로 동작함을 확인하였다.



<그림 4> Verilog-HDL로 설계된 모듈의 시뮬레이션 결과 신호에 대한 주파수 응답 특성 그래프 : (가) 입력 데이터 신호의 주파수 응답 특성, (나) 첫 번째 인터폴레이터 출력 신호의 주파수 응답 특성, (다) Inverse sinc LPF 출력 신호의 주파수 응답 특성

#### IV. 결론

본 논문에서는 수중 센서 노드 송신부를 위한 인터폴레이터를 설계하였다. 수중 센서 노드는 비교적 주파수가 낮은 음파 대역 신호를 이용하여 무선 통신을 하기 때문에 반송파 대역 신호 처리까지 디지털 부에서 담당한다. 따라서 베이스밴드 대역 신호는 반송파 대역 신호 처리가 가능하도록 신호의 샘플링 레이트가 증가하여야 한다. 본 논문에서는 회로 구조가 간단한 CIC 인터폴레이터를 기본으로 샘플링 레이트 증가 회로를 설계하였다. 하지만 CIC 인터폴레이터는 통과 대역의 감쇠가 크고 전이 대역의 폭이 넓다. 그래서 이를 보완하기 위하여 inverse sinc LPF를 추가하였으며, ModelSim 및 Matlab을 이용하여 시간 영역 및 주파수 영역에서 동작을 확인하였다. 그 결과 통과 대역에서의 감쇠는 약 4.2 dB 향상되어 0.5 dB가 되었다. 또한, 저지 대역에서의 감쇠는 약 67 dB 낮아져 -77 dB 됨에 따라 전이 대역의 폭이 약 3 kHz에서 0.25 kHz로 감소되었다. 본 연구에서 설계된 수중 센서 노드용 인터폴레이터는 분산형 수중 관측 제어망에 통합되어 남해 및 서해에서 테스트 될 계획이다.

#### 참고문헌

- [1] Young-Dong Kim, "Transmission Performance of MANET on 3D Underwater Communication Environments," *Journal of the KIECS*, Vol.12, No.6, 2017, pp.997-1002.
- [2] 임태호·고학립, "수중음향통신을 위한 물리계층 기술," *한국통신학회, 정보와 통신 학회지*, 제44권, 제8호, 2016, pp.63-70.
- [3] Muhammad Ayaz, Azween Abdullah, Ibrahima

- Faye, and Yasir Batira, "An efficient Dynamic Addressing based routing protocol for Underwater Wireless Seneor Networks," Computer Communications, Vol.35. No.4, 2011, pp. 475-486.
- [4] 해수부 해사안전관리과, 해수부, 겨울철 자연재난 대비 해양수산 시설 점검한다, 정부 24 - 기관소식, <https://www.gov.kr/portal/ntnadmNews/2014630>, 2019.
- [5] SKT/호서대, 해양 데이터 낚는 '수중통신' 기술 공개, <http://www.bloter.net/archives/281154>
- [6] 해양수산부 해양개발과, 해수부, 최대 30km 무선 수중통신 실험 성공, <http://www.mof.go.kr/article/view.do?menuKey=376&boardKey=10&articleKey=16250>
- [7] 김정원·신진철·박형근, "Zigbee를 이용한 사용자 인식기반의 헬스케어 시스템 구현," 디지털산업정보학회논문지, 제4권, 제3호, 2009, pp.1-8.
- [8] 이두성·김선희, "센서네트워크 구축을 위한 RFID 시스템 개발," 디지털산업정보학회논문지, 제3권, 제3호, 2007, pp.11-16.
- [9] 김성렬, "왜 우리는 해저탐사에서 음파를 사용하는가?" 한국마린엔지니어링학회, 한국마린엔지니어링학회지, 제32권, 제4호, 2009, pp.481-489.
- [10] Dongsoo Lee, Sangmin Lee, Sung-Joon Park, "DSP-Based Micro-Modem for Underwater Acoustic Communications," The Journal of the Korean Institute of Communication Sciences, Vol.39, No.3, 2014, pp.275-281.
- [11] Seon Hoo Jin, Yong Kap Cho, Tae Ho Im, Hyun Ma, Hak Lim Ko, "Studies on the structure and operating frequency for the underwater base-station based on underwater acoustic communication systems," Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Science, 2015, pp.448-449.
- [12] 김선희, "수중기저국 수중 음향 통신을 위한 DUC/DDC 설계," 한국산학기술학회논문지, 제18권, 제5호, 2017, pp.336-342.
- [13] 김선희, "통과대역 및 전이영역 특성이 개선된 수중음파통신용 CIC 인터플레이터 설계," 한국산학기술학회논문지, 제19권, 제1호, 2018, pp.660-665.
- [14] Eugene B. Hogenauer, "An Economical Class of Digital Filters for Decimation and Interpolation," IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal Processing, Vol.ASSP-29, No.2, 1981, pp.155-162.

■ 저자소개 ■



김 선 희  
Kim, Sun Hee

2016년 9월~현재  
상명대학교 시스템반도체공학과  
조교수

2005년 3월~2012년 5월  
KETI 선임연구원

2002년 2월~2005년 2월  
ETRI 연구원

2016년 2월 이화여자대학교 전자공학과  
(공학박사)

2002년 2월 이화여자대학교 정보통신학과  
(공학석사)

2000년 2월 이화여자대학교 전자공학과  
(공학사)

관심분야 : WPAN, Neuromorphic system  
E-mail : happyshkim@smu.ac.kr

논문접수일: 2020년 3월 7일  
수정일: 2020년 3월 17일  
게재확정일: 2020년 3월 18일