

다중 주파수 재생을 위한 광대역 수중 음향 신호 증폭기 설계 연구

A study on wideband underwater acoustic signal amplifier design for generating multi-frequency

이동훈,^{1,2} 유승진,² 김형문,² 김형남^{1†}

(Dong-Hun Lee,^{1,2} Seung-Jin Yoo,² Hyeong-Moon Kim,² and Hyoung-Nam Kim^{1†})

¹부산대학교 전자공학과, ²국방과학연구소

(Received April 4, 2017; revised April 21, 2017; accepted May 30, 2017)

초 록: 본 논문에서는 수중에서 운용하는 임베디드 능동 음향탐지 시스템에 적용하기 위한 광대역 송신 전력 증폭기 설계/제작/시험 과정에서 발생된 문제를 분석하고 해결방안을 제시한다. 최근 수중음향 분야에서도 탐지 성능을 향상시키기 위해 광대역 소나(Sound Navigation and Ranging, SONAR) 신호처리 연구가 진행되고 있으며 이를 위한 광대역 수중음향 송수신 장치 개발이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 임베디드 시스템 특성상 복잡하지 않고 구현이 간단한 2 레벨 톱니파 형태의 Class D 급 PWM(Pulse Width Modulation) 신호 생성 방식을 사용하여 광대역 수중음향 신호를 생성한 이후에, 송신 증폭기를 통하여 다양한 형태의 송신 파형을 재생하고 수중에서 실험을 하는 과정에서 두 가지 이상의 주파수를 가진 소나 신호를 동시에 재생한 경우, 원신호에 두 신호의 주파수 차의 정수배만큼 더해진 기생 주파수가 나타나는 현상이 발생하여 원하지 않은 송신 음원이 재생되는 문제가 있음을 발견하였다. 이러한 문제점의 원인을 분석하기 위해 MATLAB 및 Simulink를 이용하여 송신 하드웨어 및 PWM 제어 과정을 모델링하고 시뮬레이션 하였으며, 시뮬레이션을 통해 문제점을 재현하고 해결방안을 제시한다.

핵심용어: 임베디드 능동 음향탐지 시스템, 수중음향, 광대역 송신 증폭기, PWM(Pulse Width Modulation)

ABSTRACT: The problem that occurred in the design/fabrication/testing of the wideband transmitting power amplifier for an embedded active SONAR (Sound Navigation and Ranging) system operating underwater was analyzed and the solution of the problem was proposed in this paper. Wideband acoustic SONAR systems had been developed in order to improve the underwater detection performance. The underwater acoustic transmission system had been also developed to achieve the wideband SONAR system. In this paper, the wideband acoustic transmission signal was generated using a 2 Level sawtooth type Class D PWM (Pulse Width Modulation) which was not complicated to implement. When the sonar signals having two or more frequencies were simultaneously generated, parasitic frequencies were added to the original signals by integer multiples of the frequency difference of the original signal. To cope with this problem, we proposed a way to remove the parasitic frequency from the source signal through modeling and simulation of the implemented power amplifier and PWM control hardware using MATLAB and Simulink.

Keywords: Embedded active sonar system, Underwater acoustic, Wideband power amplifier, PWM(Pulse Width Modulation)

PACS numbers: 43.38.Lc, 43.30.Vh

1. 서 론

†Corresponding author: Hyoung-Nam Kim (hnkim@pusan.ac.kr)
Department of Electronics Engineering, Pusan National University, 2,
BusanDaehak-ro, 63 Beon-gil, Geumjeang-gu, Busan 46241 Republic
of Korea
(Tel: 82-51-510-2394, Fax: 82-51-515-5190)

수중 음향환경에서 수중운동체를 탐지하는 방법으로 음향신호 송신을 통한 능동 탐지기법을 주로

사용하며, 원거리 탐지 및 탐지 성능 향상을 위하여 복합형태의 신호를 고음압으로 재생할 수 있는 시스템을 개발하고 있다.^[1-5] 복합형태의 신호는 한 번에 다양한 형태의 수중음향 신호를 사용하여 송수신함으로써 탐지를 위한 정보를 더 많이 얻을 수 있기 때문에 최근에 이러한 복합형태의 신호를 사용하기 위해서 광대역 음향 센서 연구 및 광대역 송수신 시스템 개발이 진행되고 있다.^[5-7]

원거리 탐지를 위해 고음압 송신이 가능하면서 복합형태의 광대역 신호를 생성하기 위한 송신 신호 증폭기 개발이 함께 고려되고 있다. 이전까지의 임베디드형 소형 수중운동체에 사용되는 능동 소나 시스템은 주로 협대역으로 처리하였기 때문에 증폭기 제어를 위상제어(phase control) 방식으로 사용하였는데, 이 방식은 저속 스위칭에 적합하고 비교적 구현이 간단하지만 고조파 성분이 많아 광대역 영역에서는 사용이 적합하지 않다.^[8] 반면, 고속 스위칭이 필요한 PWM(Pulse Width Modulation) 방식은 고조파(harmonics) 성분이 적어 광대역 송수신 시스템에 적합하다.^[8,9] 따라서 본 논문에서는 광대역 신호를 생성하기 위해 Fig. 1(d)와 같은 삼각파(triangle wave)에 비해 구현이 간단하고 고주파 신호 생성에 유리한 Fig. 1(c)와 같은 톱니파(sawtooth wave) 형태의 2 레벨 PWM 방식으로 송신 신호를 생성하였다. Fig. 1(a)와 같은 2 레벨 방식은 Fig. 1(b)와 같은 3 레벨에 비해 회로와 드라이브 제어방법이 간단하여 채택하였다.

Class D급 PWM 제어 방식으로 송신 증폭기를 설계하고 이를 이용한 수조 시험에서 얻은 데이터로 스펙트로그램 분석을 해 본 결과, 서로 다른 주파수의 두 신호를 동시에 사용할 때, 원 신호에 두 신호의 주파수 차의 정수배만큼 더해진 기생주파수가 나타

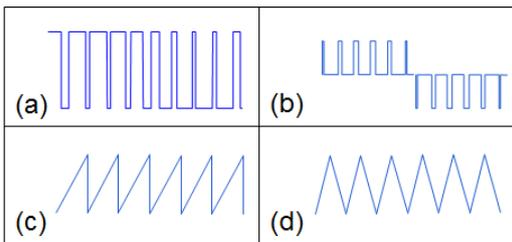


Fig. 1. Switching methods. (a) 2 level, (b) 3 level, (c) sawtooth carrier, (d) triangular carrier.

나는 현상이 발생하여 송신하고자하는 신호 외에 원치 않는 신호가 출력되는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상의 원인을 분석하고 해결하기 위해 송신 센서를 더미로드로 대체한 실험을 수행하고, MATLAB 및 Simulink를 이용하여 송신 증폭기와 PWM 제어 과정을 모델링 및 시뮬레이션 하였으며 기생 주파수가 발생하는 현상을 확인하고 문제의 해결방안을 제안하였다.

본 논문에서 제시한 기생 주파수 문제 해결 방법은 앞으로 수중 탐지 성능 향상을 위해 필연적으로 적용될 광대역 다중주파수 송신 시 증폭기 설계 단계에서 발생할 문제를 사전에 피하고 원하는 신호를 생성하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 광대역 다중주파수 음향송신 실험

음향 송신장치를 Table 1과 같은 사양으로 설계 및 제작한 후 음향 수조에서 광대역 다중 주파수 수중 음향 송신 특성을 측정하기 위한 실험을 Fig. 2와 같이 수행하였다. 증폭기 성능 확인을 위한 실험 신호로 다양한 형태의 파형을 실험예제로 선정하고, 음향 트랜스듀서와 연동하여 수조에서 종류 당 20회 이상의 송신시험을 수행하였다. 그 중에서 대표되는 파형은 Tables 2와 3과 같다. Table 2 는 두 가지 형태

Table 1. Specification of power amplifier.

Content	Specification
Output power	600 W, 2A
DC link	300 V, 5A
Frequency band	f_0 kHz ~ (f_0+30) kHz
Carrier frequency	390.625 kHz
Bridge type	Full bridge (4 Channel)

Table 2. Experimental transmission signal for the watertank test with multi-frequency.

Signal type	Frequency
CW (Continuous Wave)	f_1 kHz
LFM (Linear Frequency Modulation)	(f_1+4) kHz ~ (f_1+6) kHz

Table 3. Experimental transmission signal for the watertank test with single frequency.

Signal type	Frequency
CW (Continuous Wave)	f_1 kHz
LFM (Linear Frequency Modulation)	(f_1+2) kHz ~ (f_1+8) kHz

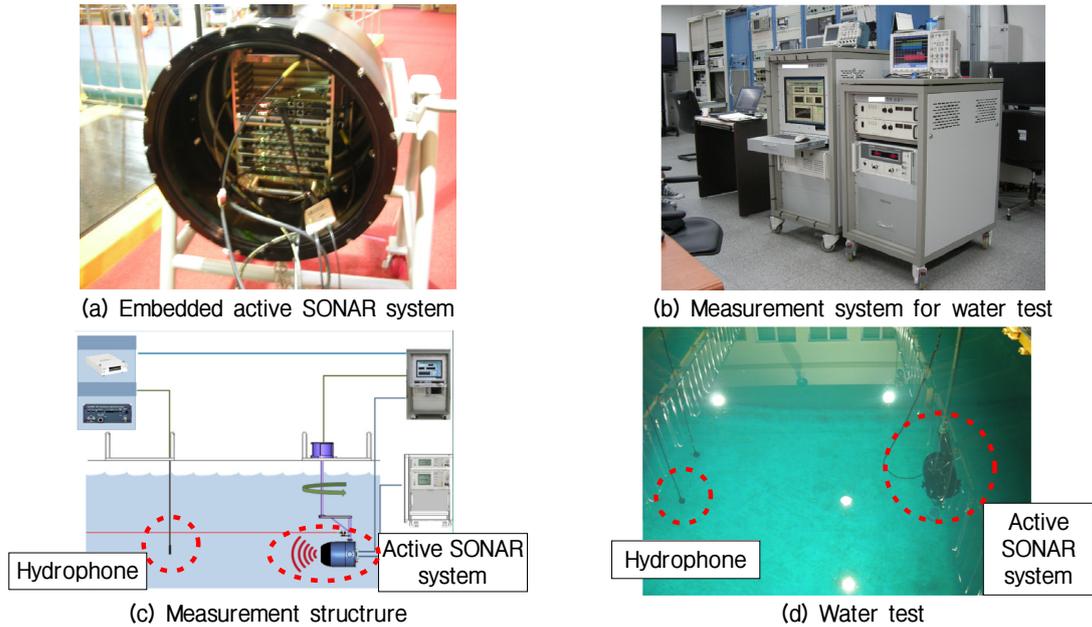


Fig. 2. Photos of experiment and experimental conceptual diagram.

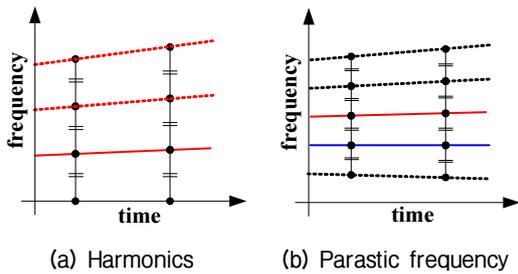


Fig. 3. Harmonics vs parastic frequency (dotted line).

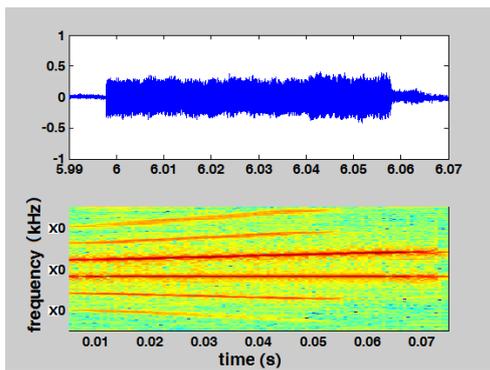


Fig. 4. Spectrogram of the watertank test with multi-frequency.

의 신호를 동시에 사용하여 출력하는 방법이고, Table 3은 CW 신호와 LFM 신호를 각각 단일 송신하는 방법이다.

수조에서 하이드로폰으로 측정된 결과, 두 종류의 송신신호를 동시에 출력한 실험에서 두 신호에 주파수 차이의 정수배만큼 더해지는 기생 주파수가 Fig. 4에서와 같이 반복적으로 생성되는 경우가 발생하였으며, 이는 송신 주파수의 고조파 성분과는 다르다.

일반적인 고조파 성분은 Fig. 3(a)의 점선과 같이 원 신호(실선) 주파수의 배수만큼 발생이 되는 성분인 것에 반해, 본 실험에서 발생한 기생 주파수는 Fig. 3(b)의 점선과 같이 두 원신호(실선)의 주파수 차이만큼 추가로 발생하는 성분이다. 이 기생 주파수 문제는 Table 3과 같이 CW 신호와 LFM 신호를 각각 단일 송신하였을 때는 Fig. 5에서와 같이 발생하지 않았다. 따라서 Fig. 4에서 관찰되는 기생 주파수는 송신기 하드웨어의 구조적인 문제나 스위칭 제어오류로부터 발생한 것이 아닌 것으로 판단된다. 참고로, 제작한 음향송신장치는 단일 주파수 송신에서는 문제없이 사용하던 기존의 회로구조였다.

기본적으로 스위칭을 위한 하드웨어는 문제가 없는 것으로 보이며, 신호생성에 영향을 주는 필터나 신호생성을 수행하는 소프트웨어도 기존의 단일 주파수 생성에 많이 사용하던 방식이라 문제가 있다고 볼 수는 없었다. 추가적인 원인으로 송신용 트랜스 듀서와 연동성 오류를 고려해 볼 수 있다. 본 논문

서는 이러한 문제 해결을 위한 방법으로, 기생 주파수 문제가 전력 증폭기가 아닌 센서와의 연동 과정에서 초래된 것인지 알아보기 위해 우선적으로 센서의 전기적 등가 모델로 제작한 더미로드를 이용하여 추가 실험을 하였다. 참고로, 더미로드는 센서 설

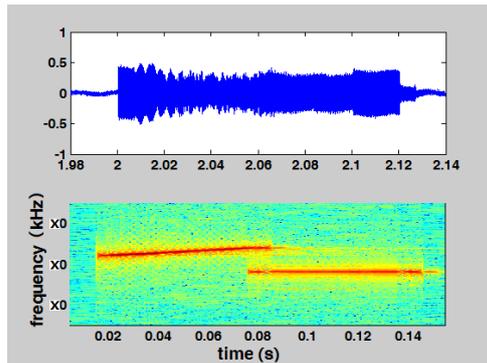


Fig. 5. Spectrogram of the watertank test with single frequency.

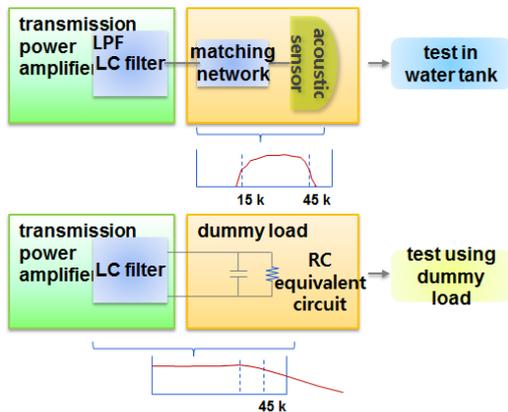


Fig. 6. Frequency responses of the sensor and dummy load.

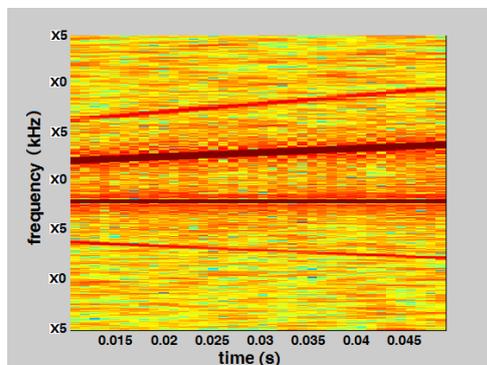


Fig. 7. Spectrogram of the dummy load test with multi-frequency.

계단계에서 계산된 등가회로로 제작되었으며 Fig. 6에서처럼 실제 센서의 주파수 특성과는 다르다.

더미로드를 이용한 실험에서도 Fig. 7과 같이 의도치 않은 기생 주파수가 확인되었고, 따라서 이 기생 주파수는 센서와 연동하면서 증폭될 수는 있어도 센서에 의해 만들어지는 성분은 아니라는 것을 알 수 있다. 근본적으로 송신 전력 증폭기의 출력으로부터 초래된 것임을 추측할 수 있다. 단, 이러한 기생 성분은 원 신호보다는 크기가 상대적으로 매우 작다. 다만 이러한 성분이 수중에서 음향센서와 결합하여 송신 시에 Fig. 4와 같이 원신호 만큼이나 크게 송신될 수 있기 때문에 아주 작은 성분이라도 제거할 필요가 있다.

일반적으로 송신 증폭기 출력신호의 특성을 결정 짓는 것은 하드웨어적인 회로와 신호를 재생하는 방식이며, 이것을 수학적 방법으로 해석하기에 앞서 원인을 찾기 위해 수정이 수월하고 단시간에 가상시험이 가능한 시뮬레이션을 통하여 원인을 분석하고자 한다. 참고로, 시뮬레이션 결과에서 보여주는 스펙트로그램은 기생 성분을 잘 보여주기 위해 크기부분을 확대하여 표시하였다.

III. 시뮬레이션 분석

기생 주파수 문제가 송신 전력 증폭기의 제작과정이 아닌 재생 신호 설계과정에서 초래한 문제라면 실제 실험을 모사한 시뮬레이션에서도 동일한 문제가 발생할 것으로 추론하였다. 기생 주파수 문제의 원인을 분석하고 문제 해결방안을 찾기 위해 MATLAB과 Simulink를 이용해 송신 하드웨어를 모델링하고 실제 실험과 유사한 구조로 모사하였다.

송신주파수의 파형에 관련된 소프트웨어와 하드웨어 항목은 크게 두 가지가 있다. PWM 제어의 정확성과 출력부 필터의 스위칭 주파수 필터링 회로이다. 구현된 신호생성 하드웨어와 동일한 정밀도 및 이상적인 PWM 제어 과정을 모델링하고 그 결과를 확인하는 방법으로 MATLAB을 사용하였으며, 출력 필터는 등가회로로 모델링하고, 더미로드와 동일한 출력 임피던스로 모사하였다. 또한, 실제 구현된 필터와 동일한 구조로 구성하고, 센서의 실제 측정된

임피던스를 적용하며, 실제 스위칭 회로와 유사한 시뮬레이션을 위해 Fig. 8과 같이 Simulink를 사용하였다.

Fig. 8에서 점선 사각형은 PWM 제어과정이 이루어지는 부분이고, 실선 사각형은 센서에 해당하는 등가 임피던스 부분이다. MATLAB 시뮬레이션과 다른 점은 PWM 드라이브 회로와 송신용 출력 필터

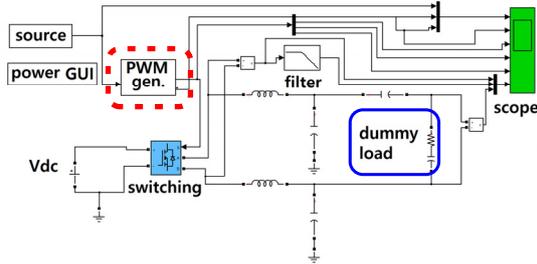


Fig. 8. Equivalent circuit of the power amplifier with the equivalent model of the sensor based on impedance curve.

를 실제 제작된 하드웨어와 유사하게 모사할 수 있다는 것이다.

하드웨어를 고려한 Fig. 9 (Simulink 사용)과 이론적으로 계산된 Fig. 10 (MATLAB 사용)에서와 같이 시뮬레이션 결과에서도 기생 주파수 문제가 존재함을 확인하였다. 따라서 기생 주파수 문제는 실제 송신 전력 증폭기의 제작과정에서 회로에 사용된 소자의 자체적 결합이나 환경적 영향으로부터 초래한 것이 아님을 확인하였으며, 스위칭 구동 방식의 문제로 초래된 것이라 추론하고 다양한 구동 방식에 변화를 주어 문제를 해결하고자 하였다.

기생 주파수 문제의 원인을 파악하고 해결방안을 모색하기 위해 소스신호의 보간법 (interpolation 또는 naturally sampling) 적용, 비교기 파형 변경과 스위칭 방법을 2 레벨에서 3 레벨로 변경하는 등 구동 방식에 다양한 변화를 주어 시뮬레이션하였다. 그 결과, 기존 톱니파를 쓰던 비교기 파형을 삼각파로 하였을

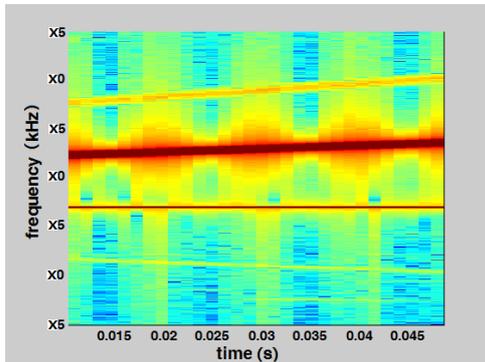


Fig. 9. Spectrogram of the Simulink simulation result using the equivalent model the sensor with sawtooth carrier.

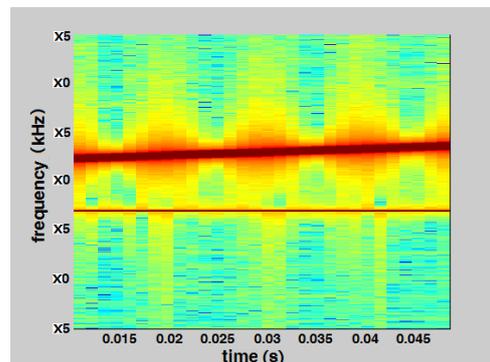


Fig. 11. Spectrogram of the Simulink simulation result using the equivalent model the sensor with triangular carrier.

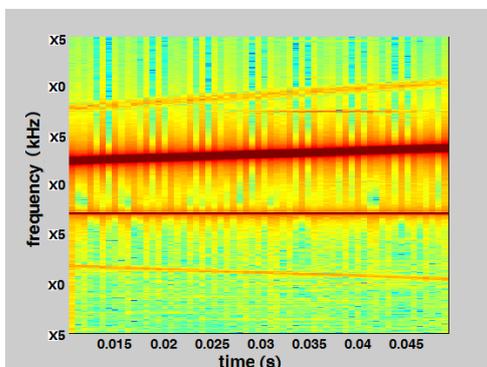


Fig. 10. Spectrogram of the MATLAB simulation result using the dummy load circuit with sawtooth carrier.

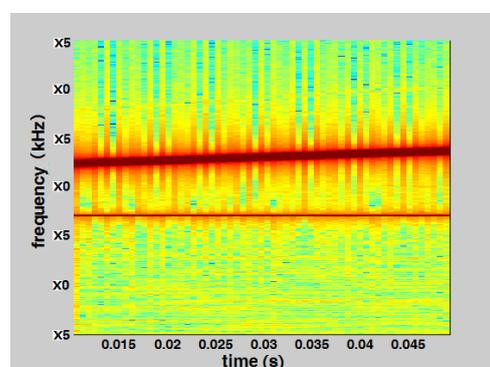


Fig. 12. Spectrogram of the MATLAB simulation result using the dummy load circuit with triangular carrier.

때에만 기생 주파수 성분이 사라지고 실제 의도한 주파수 영역의 신호만 출력됨을 Figs. 11과 12에서와 같이 확인하였다. 삼각파형을 구현할 때는 톱니파와 달리 카운터를 이용하여 간단하게 구현할 수 없으므로, 삼각파 비교기를 로직으로 구현하거나 삼각파 PWM을 지원하는 칩을 사용하여야 한다.

여기서 Figs. 11과 12 모두 2 레벨 방식을 사용하였으며, Fig. 11은 Simulink를 사용하고 Fig. 12는 MATLAB을 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 각각 실제 센서 측정값, 계산된 더미로드값을 사용한 결과를 보여주고 있으며 다른 센서 등가모델을 사용하였을 때도 비슷한 결과를 가진다.

IV. 결 론

기존 단일주파수 송신 시에는 비교적 구현이 간단한 톱니파 형태의 PWM 구동 방식을 사용하였다. 그러나 수중 음향 트랜스듀서를 사용하는 광대역 다중 주파수 송신에서는 송신한 두 신호의 주파수 차의 정수배만큼 더해진 기생 주파수가 나타나는 현상을 발견하였다. 본 논문에서는 기생 주파수의 원인을 파악하고 분석하였으며, 삼각파 형태의 PWM 구동 방식을 사용함으로써 기생 주파수 성분을 제거할 수 있는 해결방안을 제시하였다. 삼각파를 사용한 PWM 신호는 대칭인 반면, 톱니파는 비대칭이기 때문에 기생주파수가 발생되는 것으로 추정되며, 추후 추가적인 연구를 통해 기생 주파수 문제를 이론적으로 분석하고 삼각파 구동 방식의 문제 해결 타당성을 검증할 예정이다.

References

1. S. C. Butler and F. A. Tito. "A broadband hybrid magnetostrictive/piezoelectric transducer array," Oceans 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. **3**, 1469-1475 (2000).
2. M. P. Hayes, P. J. Barclay, P. T. Gough, and H. J. Callow, "Test results from a multi-frequency bathymetric synthetic aperture sonar," OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition. 1682-1688 (2001).
3. P. Chapman, D. Wills, G. Brookes, and P. Stevens, "Visualizing underwater environments using multifre-

quency sonar," IEEE Computer Graphics and Applications. **19**, 61-65 (1999).

4. K. H. Kim, D. S. Cho, and J. C. Kim. "High frequency acoustic scattering analysis of underwater target" (in Korean), Journal of the Society of Naval Architects of Korea **42**, 528-533 (2005).
5. J. W. Shin, W. J. Kim, D. W. Do, D. H. Lee, and H. N. Kim. "Fast wideband active detection and doppler estimation using the extended replica of an HFM pulse in active SONAR systems" (in Korean), Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers **51**, 11-19 (2014).
6. X. Song, P. Willet, and S. Zhou, "Range bias modeling for hyperbolic-frequency-modulated waveforms in target tracking," IEEE Journal of Oceanic Engineering, **37**, 670-679 (2012).
7. Y. Doisy, L. Deruaz, S. P. vanljsselmuide, and S. P. Beerens, "Reverberation suppression using wideband doppler-sensitive pulses," IEEE Journal of Oceanic Engineering, **33**, 419-433 (2008).
8. D. H. Jang, G. H. Choe, and M. Ehsani, "Asymmetrical PWM technique with harmonic elimination and power factor control in AC choppers," IEEE Transactions on Power Electronics, **10**, 175-184 (1995).
9. B. G. Cho, H. C. Jin, and K. W. Lee, "Real-time implementation of variable-frequency sinusoidal PWM with harmonics suppressing characteristics" (in Korean), The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers 1071-1073 (1992).

저자 약력

▶ 이 동 훈 (Dong-Hun Lee)



1990년 3월: 경북대학교 전자공학과 학사
1994년 3월: 경북대학교 전자전기공학부 석사
1996년 1월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임 연구원
2010년 3월 ~ 현재: 부산대학교 전자공학 전공 박사과정

▶ 유 승 진 (Seung-Jin Yoo)



2009년 2월: KAIST 원자력 및 양자공학과 학사
2013년 3월: KAIST 원자력 및 양자공학과 석사
2016년 10월 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원

▶ 김 형 문 (Hyeong-Moon Kim)



1993년 3월: 창원대학교 전기공학 학사
2000년 3월: 창원대학교 전기전자제어공학 석사
2001년 11월: 한국항공우주산업(주) 연구원
2006년 7월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임 연구원

▶ 김 형 남 (Hyoung-Nam Kim)



1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학 학과 학사 졸업
1995년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학 학과 석사 졸업
2000년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학 학과 박사 졸업
2000년 5월: 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 박사 후 연구원
2000년 5월 ~ 2003년 2월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소 선임 연구원
2003년 3월 ~ 2007년 2월: 부산대학교 전자전기통신공학부 조교수
2007년 3월 ~ 2012년 2월: 부산대학교 전자전기공학부 부교수
2009년 2월 ~ 2010년 2월: Johns Hopkins Univ. Visiting Scholar
2015년 9월 ~ 2016년 8월: Univ. of Southampton Visiting Professor
2012년 3월 ~ 현재: 부산대학교 전자공학과 교수