

음향 OFDM의 음질 저하 원인 분석

An Analysis on Audio Quality Deterioration of Acoustic OFDM

조 기 호*, 윤 환 식*, 장 준 혁**, 김 남 수*

(Kiho Cho*, Hwan Sik Yun*, Jun-Hyuck Chang**, Nam Soo Kim*)

*서울대학교 전기컴퓨터공학부, **인하대학교 전자공학부

(접수일자: 2008년 12월 17일; 수정일자: 2008년 12월 31일; 채택일자: 2009년 1월 2일)

음향 OFDM (Acoustic OFDM)은 스피커와 마이크를 이용한 가청주파수 대역에서 음향 통신을 하기 위해 제안된 것으로, 1600 Hz의 대역을 사용할 때 약 1 kbps로 데이터를 전송할 수 있다. 음악이나 음성 등의 오디오에 음향 OFDM 신호를 삽입하여 음향 통신을 하는데, 오디오에 음향 OFDM을 삽입하게 되면 OFDM 프레임의 보호 구간, 프레임 간의 중첩 구간 그리고 대역 저지 필터의 지지대역 성분 등에 의해 필연적으로 음질 저하의 문제점이 발생한다. 본 논문에서는 음향 OFDM 신호를 삽입한 오디오에서 발생하는 음질 저하의 원인을 체계적으로 분석하고, 음질 저하를 줄일 수 있는 방안에 대해 논의한다.

핵심용어: 가청주파수대역 음향통신, 음향 OFDM, 정보 은닉, 오디오 워터마킹

투고분야: 음향 통신기술 분야 (6)

Acoustic OFDM is used for audible frequency band acoustic communication which employs loudspeaker as transmitter and microphone as the receiver antenna. Since acoustic OFDM can transmit about 1 kbps using 1600 Hz band, acoustic OFDM signal is inserted into the audio signal like music or speech. However, audio quality deteriorates definitely during the inserting process. This paper introduces a reason for audio quality deterioration and discuss how to reduce this phenomenon.

Keywords: Audible frequency band acoustic communication, Acoustic OFDM, Data hiding, Audio watermarking

ASK subject classification: Acoustic Communication (6)

I. 서론

정보를 사람이 인지할 수 없도록 바탕이 되는 오디오 신호 등에 심는 정보 은닉 (data hiding) 기술의 응용으로, 그림 1에 표현한 것과 같이 오디오 신호에 정보를 심은 후 그 오디오를 재생하고, 재생된 오디오를 마이크로폰을 이용하여 입력을 받아 심겨진 정보를 추출하는 일종의 단방향 통신 시스템을 생각할 수 있다. 이 시스템은 음향 신호인 오디오를 통해 정보를 전송하기 때문에 가청주파수 대역을 이용한다. 따라서 위와 같은 시스템을 가청주파수 대역 음향 통신시스템이라고 정의한다.

가청주파수 대역 음향 통신 시스템을 실제로 사용할 수 있으려면 음질, 정보량, 통신 성능 세 가지 요소를 모두 만족시켜야 한다. 하지만 이 세 가지 요소는 서로 반대적인 개념으로, 예를 들어 음질 저하가 작은 방법은 정보

량과 통신 성능에서 손해를 보고, 정보량이 많은 경우에는 보통 음질 저하가 커지게 된다. 이런 반대적인 세 가지 요소를 적절히 만족하는 시스템을 개발해야 가청주파수 대역 음향 통신을 실제로 이용할 수 있을 것이다.

가청 주파수 대역 음향 통신을 위한 기존 기술로 번저 듣기에 거부하지 않은 소리들을 만들어서 음향 통신을 하려는 시도가 있었다 [6]. 또한 저작권 인증 등에 사용되는 오디오 워터마킹 기술을 응용하여 가청주파수 대역 음향 통신에 적용한 사례가 있었는데, 음질 저하 수준은 작았지만 통신 성능과 정보량 모두 음향 통신에 적합한 수준이 아니었다 [1-2]. 최근에 본격적인 가청주파수 대역 음향 통신을 위한 기술로 음향 OFDM이 제안 되었는데 [3], 약 1600 Hz의 대역을 제거하고 그 대역에 약 1 kbps 수준의 데이터 전송이 가능한 OFDM 신호를 심는 방식이다. 하지만 저지 대역 필터를 사용하는 음향 OFDM의 기본 구조상 통신 성능 저하를 유발할 수 있으며, 음질 저하도 필연적으로 생기게 된다.

본 논문의 이후 구성은 다음과 같다. II장에서는 음향

책임저자: 김 남 수 (nkim@snu.ac.kr)

151-742 서울시 관악구 관악로 599 서울대학교 공과대학 전기공학부
(전화: 02-880-1824, 팩스: 02-880-8219)

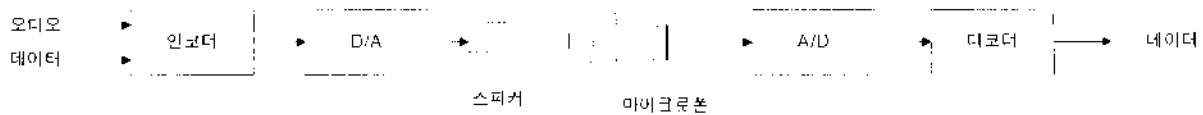


그림 1. 가청주파수 대역 음향 통신 시스템
 Fig. 1. Audible frequency band acoustic communication system.

OFDM 신호 삽입 방식을 간략히 설명하고, III장은 신호 삽입 과정에서 일어나게 되는 음질 저하를 주관적 음질 평가 실험을 통해 보인다. IV장에서는 음질 저하가 생기는 원인을 분석하고, 음질 저하를 줄일 수 있는 방법에 대해 논의한다. 그리고 V장에서 결론을 맺는다.

II. 음향 OFDM 신호 삽입 방법

음향 OFDM의 신호 삽입 과정은 다음과 같다. 먼저 오디오 신호의 일정 대역을 대역 지지 필터로 제거하고 그 대역에 OFDM 신호를 삽입한다. 지지 대역 및 음향 OFDM 신호 삽입 대역은 6400~8000 Hz이다. 그런데 OFDM 신호를 곧바로 삽입하지 않고, OFDM 신호의 각 부반송파들의 크기를 각각의 대역에 해당하는 원래 오디오 신호의 DFT 계수의 크기와 같게 조정된 뒤에 삽입한다.

OFDM 신호는 보내고자 하는 정보를 DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying)로 기저대역에서 변조하고, 각각의 DBPSK 신호는 삽입하고자 하는 주파수 대역의 OFDM 부반송파에 의해 변조되어 만들어 진다. OFDM 부반송파에 의한 변조 과정은 IFFT에 의해 간단히 구현이 가능하며, IFFT를 수행하기 전에 OFDM 부반송파의 크기를 조정한다. 생성된 OFDM 신호는 반향을 대비한 보호 구간을 삽입하고, 불연속점에 의한 음질 저하 및 사이드로브의 누설을 막기 위해 일부 신호를 중첩하여 더한다. 이러한 중첩 구간은 각각의 OFDM 프레임 사이에서 일어나는 심한 위상 변화에 의해 생기는 급격한 위상 변화를 완충시키는 역할을 한다. 중첩에 필요한 윈도우는 단순한 삼각형 윈도우를 사용하였다 [3].

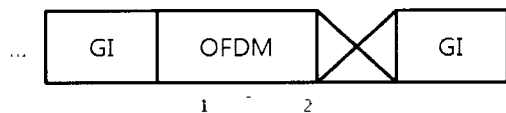


그림 2. 음향 OFDM 신호의 보호 구간 (GI)과 중첩 구간. 중첩 구간 등에서 음질 저하가 일어날 수 있다.
 Fig. 2. Guard interval (GI) and overlap region. Audio quality degradation would occur in overlap region.

III. 음향 OFDM의 음질 저하 현상

음향 OFDM에서 생기는 음질 저하는 주로 마치 변레 울음 같은 고주파 소리가 들리는 형태이다. 그림 3은 중첩 구간의 길이를 600으로, FFT의 길이를 1024로 하여 구현한 음향 OFDM 신호가 삽입된 음성과 원본 음성 신호의 차이이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 음향 OFDM 신호를 삽입하여 생기는 잡음은 OFDM 신호 구간의 양쪽 끝에서 임펄스 형태로 나타나며, 이 임펄스의 대역은 6400~8000 Hz으로 제한된다.

음질 측정 방법으로는 주관적 평가 방법을 사용하였으며, 기존 논문에서 발표된 음질 평가는 MUSHRA 테스트로 측정되었다 [4]. MUSHRA 테스트는 원본 오디오와 128 kbps MP3 변환된 오디오, 음향 OFDM 신호를 삽입한 오디오, 저주파 통과 필터를 통과한 오디오 등을 비교하여 원본 오디오를 100점으로 했을 때 0점부터 100점까지 주관적인 평가를 내리는 방법이다. 0~20점은 poor, 20~40점은 bad, 40~60점은 fair, 60~80점은 good, 80~100점은 excellent를 의미한다.

발표된 음질 평가를 요약해 보면, 장르별로 음질 저하 수준이 다르다는 것을 가장 큰 특징으로 꼽을 수 있다. 락 음악의 경우에는 MP3 변환과 크게 차이가 없는 수준의 음질 저하를 보였지만, 음성의 경우 3.5 kHz 저주파 통과 필터를 통과한 음성보다도 안 좋은 평가를 받았으며, 팝 음악과 재즈 음악은 락 음악과 음성의 중간 수준의

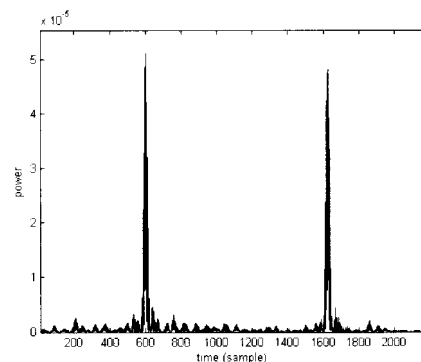


그림 3. 음향 OFDM 신호를 삽입할 때 생기는 잡음의 예시
 Fig. 3. Error between original audio and acoustic OFDM signal inserted audio.

표 1. 음향 OFDM MOS 테스트 결과
Table 1. Acoustic OFDM MOS test result

	Rock	Pop	Jazz	Classic	평균
점수	1.3	1.25	1.05	1.75	1.34

평가를 받았다. 절대적인 점수로 판단한다면 락 음악을 제외하고는 excellent의 점수를 받은 경우가 없었다.

[3]에서 설명하는 음향 OFDM 시스템을 구현하여 위에서 설명한 실험 결과의 정향성을 검증하기 위해 주관적 음질 평가를 하였다. 실험 대상은 성인 남녀 9명이었으며, 헤드폰을 사용하여 락, 팝, 재즈, 클래식 음악에 각 2곡씩 총 8곡에 대해 음질 저하 정도를 측정하였다. 원본 음악과 음향 OFDM 신호가 삽입된 음악을 비교하여 음질 차이에 따라 -3점부터 3점까지 총 7단계의 점수를 주었다. 점수가 3점에 가까울수록 음향 OFDM의 음질 저하가 심하다는 의미이며, -3점에 가까울수록 음향 OFDM의 음질이 원본보다 좋다는 의미이다. 사실 0보다 작은 점수가 나오는 것은 거의 불가능하다.

표 1을 보면, 전반적으로 모든 장르에서 1점 이상의 평가를 받아 평균적으로 음질 저하를 조금씩은 느낄 수 있는 수준이었으며, 특히 클래식 음악의 경우에는 1.75점으로 평균에 비해 음질 저하가 더 크다는 것을 보여주었다. 음향 OFDM이 실제로 사용이 가능하려면 헤드폰을 쓴 경우에도 음질 저하를 거의 느낄 수 없어야 하는데, 현재는 락 음악에서도 요구 수준을 만족하기 힘든 것이 사실이다.

IV. 음향 OFDM의 음질 저하 원인 분석

III장에서 정리된 음향 OFDM의 음질 저하 현상은 음성이나 클래식 음악 등에 더 크게 나타남을 알 수 있다. 락 음악은 평균적으로 오디오 신호 세기가 크며, 클래식 음악이나 음성은 그 반대이다. 즉, 오디오 신호의 세기가 클수록 음질 저하가 낮은 경향을 보인다. 이것은 임펄스 형태의 잡음을 현재의 음향 OFDM 신호 삽입 방법이 상쇄하지 못하기 때문이다.

현재의 음향 OFDM 신호 삽입 방식에서 음질 저하가 발생하는 것을 상쇄하지 못하는 이유는 크게 세 가지로 분석될 수 있다. 첫째로 음향 OFDM 시스템의 정보 삽입 과정은 필터로 일부 대역을 걸러내고 그 대역에 통신 신호를 삽입하는 구조이기 때문이다. 실제 사용할 수 있는 필터는 이상적이지 않으므로, 저지 대역에서도 신호가 어느 정도 남아 있다. 따라서 OFDM 신호가 원래 오디오

신호의 스펙트럼 크기와 같더라도 오디오 신호의 스펙트럼 크기에 왜곡이 생기게 되며, 저지 대역에 남은 신호 성분은 음질 저하의 원인을 제공할 뿐만 아니라 통신 시스템으로 가정하면 노이즈의 역할을 하게 되어 통신 성능에 영향을 주게 된다.

두번째로 음향 OFDM 신호를 구성할 때 넣는 보호 구간이 원인이 된다. 보호 구간이 있는 부분의 오디오 신호의 스펙트럼은 OFDM 신호가 있는 부분의 오디오 신호의 스펙트럼과 다르므로 원본 오디오와 다른 스펙트럼이 삽입되게 된다. 또한 단순히 OFDM 신호의 뒷부분을 가져다 OFDM 신호 앞에 붙이는 것이기 때문에 보호 구간을 삽입하게 되면 OFDM 신호의 양쪽에서 발생하는 임펄스 형태의 잡음을 처리할 수 없게 된다.

마지막으로 중첩 구간의 문제이다. 중첩 구간은 OFDM 신호의 오른쪽 끝 부분을 모두 살리고 나서 중첩을 하게 되기 때문에 임펄스 형태의 잡음을 전혀 상쇄하지 못한다. 그림 4의 (a)는 음성 신호에 대해 6100~8000 Hz 대역에서 음향 OFDM 신호를 삽입한 후의 스펙트럼이다.

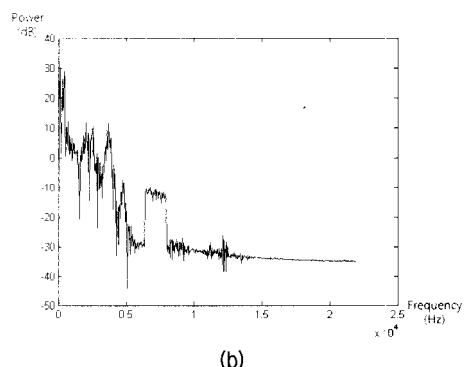
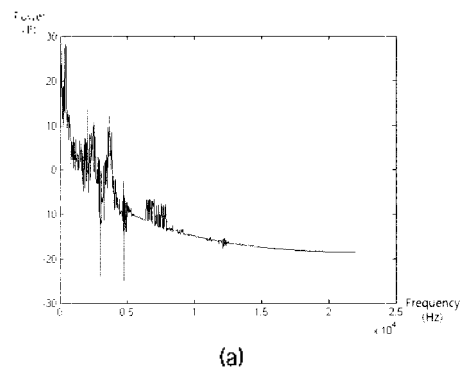


그림 4. 중첩 구간에서 생기는 음질 저하의 예시
(a) 음향 OFDM을 삽입한 구간의 음성 신호의 스펙트럼,
(b) (a)에서 20샘플 delay 한 경우의 음성 신호의 스펙트럼

Fig. 4. Example for audio quality degradation of acoustic OFDM in overlap region.
(a) Spectrum the interval exactly same with speech embedded acoustic OFDM signal
(b) spectrum 20 sample delayed than (a)

즉, 그림 2의 1번 부분에 대한 스펙트럼이라고 볼 수 있다. 이 그림을 보면, 6400~8000 Hz 대역에서 -10 dB 내외의 파워를 가지고 있음을 알 수 있다. 주변 주파수보다 6400~8000 Hz 대역의 파워가 약 5 dB정도 큰 이유는 저지 대역에 남아있는 신호 성분 때문이다. 그림 4의 (b)는 그림 4의 (a)보다 20샘플 뒤부터 구한 스펙트럼이다. 그림 2의 2번 부분에 대한 스펙트럼이라고 할 수 있다. 그림 4의 (a)와 (b)를 비교해 보면 중첩 구간에서는 데이터를 담은 주파수 대역의 파워는 -10 dB 정도의 일정한 크기로 유지가 되는데, 주변 대역은 상황에 따라 크기가 달라진다. 특히 주변 대역의 파워가 작기 때문에 약간의 차이에도 dB 스케일에서는 상당한 동적 범위를 갖게 된다. 따라서 그림 4의 (b)와 같이 때에 따라 데이터를 담은 주파수 대역이 주변에 비해 도드라지는 경우가 생기며, 이 때 상당한 음질 저하를 가져온다.

위에서 분석한 음질 저하의 원인을 바탕으로 음향 OFDM 신호 삽입에 의한 음질 저하를 줄이기 위해서는 임펄스 형태로 나타나는 잡음을 상쇄할 수 있어야 한다. 일반적인 락 음악이나 팝 음악과 같이 데이터 삽입 대역에 충분한 파워가 존재하는 경우에는 임펄스 형태의 잡음이 존재하더라도 음질 저하를 크게 느끼지 못한다. 하지만 모든 종류의 오디오에 대해 사용이 가능하기 위해서는 음질 저하가 최소화 될 수 있는 IFFT의 길이, 보호 구간과 중첩 구간의 길이와 각 구간의 윈도우에 대한 설계가 있어야 한다. IFFT를 사용하면 OFDM 신호 자체에도 윈도우를 사용하면 OFDM 신호 양 끝에서 생기는 임펄스 형태의 잡음을 상쇄하는데 결정적인 역할을 하게 되므로 음질 저하를 줄일 수 있을 것이다 [5]. 여기에 인접한 프레임의 중첩 구간에서 서로 상쇄간섭이 일어나게 하여 중첩 구간의 오디오 신호 크기가 최소화 되도록 인터리버를 구성하는 등의 방법이 있을 것이다. 음향 OFDM의 음질을 개선할 수 있는 실제적인 방법에 대해서는 추후 연구로 고려되어야 할 것으로 생각된다.

V. 결론

본 논문에서는 가청주파수 대역에서 스피커와 마이크를 이용하여 음향 통신을 할 수 있는 음향 OFDM 기술에 대해 소개하고, 신호 삽입 과정에서 생기는 오디오의 음질 저하를 관찰하고 그 원인에 대해 분석하였다. 원인은 보호 구간, 필터를 사용하는 구조와 중첩 구간의 구조

를 꼽을 수 있으며, 그 중에서 중첩 구간의 구조가 가장 큰 원인이라고 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 특히 중첩 구간의 세심한 설계가 필요하며, 추후 연구로는 음향 OFDM의 음질을 개선할 수 있는 실제적인 방법과 실험내용이 고려되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원 (KRF-2008-314-D00289)과 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업 (IITA-2008-C1090-0804-0007)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

1. N. Lazic and P. Aarabi, "Communication Over an Acoustic Channel Using Data Hiding Techniques", *IEEE Trans. on Multimedia*, Vol. 8, No. 5, pp. 918-924, Oct. 2006.
2. Y. Suzuki, R. Nishimure and H. Tao, "Audio watermarking enhanced by LDPC coding for air transmission", *IHH-MSP'06 International Conference on*, pp. 23-26, Dec. 2006.
3. H. Matsuoka, Y. Nakasuma and T. Yoshimura, "Acoustic Communication With OFDM signal Embedded in Audio", *AES 29th International Conference*, pp. 1-6, Sep. 2006.
4. H. Matsuoka, Y. Nakashima and T. Yoshimura, "Acoustic OFDM System and Performance Analysis", *IEEE Trans. Fundamentals*, Vol. E91-A, No. 7, pp. 1652-1658, Jul. 2008.
5. K. K. Paliwal and L. D. Alsteris, "On the Usefulness of STFT Phase Spectrum in Human Listening Tests", *Speech Communication*, Vol. 45, no. 2, pp. 153-170, Feb. 2005.
6. C. V. Lopes and P. M. Q. Aguiar, "Aerial Acoustic Communications", *IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, pp. 219-222, Oct. 2001.

저자 약력

•조 기 호 (Kiho Cho)

2007년 2월: 서울대학교 전기공학부 학사
2007년 3월 ~ 현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부
석사과정



•윤 환 식 (Hwan Sik Yun)



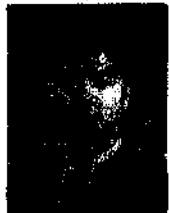
2004년 2월: 서울대학교 전기공학부 학사
 2004년 3월~ 현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석박사 통합과정

•장 준 혁 (Joon-Hyuk Chang)



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 학사
 2000년 2월: 서울대학교 전기공학부 석사
 2004년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
 2000년 3월~2005년 4월: 허넷더스 연구소장
 2004년 5월~2005년 4월: 캘리포니아 주립대학, 산타바바라 (UCSB) 박사후연구원
 2005년 5월~2005년 8월: 한국과학기술연구원 (KIST) 연구원
 2005년 9월~ 현재: 인하대학교 전자공학부 조교수

•김 남 수 (Nam Soo Kim)



1988년 2월: 서울대학교 전자공학과 학사
 1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 1994년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
 1993년 5월~1998년 2월: 삼성종합기술원 전문연구원
 1998년 3월~ 현재: 서울대학교 전기공학부 교수