

DTV 시스템에서의 MCLT 기반 오디오 워터마크 성능 평가

정영호, 이미숙, 이태진, 김휘용
한국전자통신연구원

yhcheong@etri.re.kr, lms@etri.re.kr, tjlee@etri.re.kr, hykim5@etri.re.kr

Performance Evaluation of MCLT-based Audio Watermark in DTV System

Youngho Jeong, Misuk Lee, Taejin Lee, Huiyong Kim
Electronics & Telecommunications Research Institute

요 약

본 논문에서는 DTV 시스템을 대상으로 PN 시퀀스를 이용한 MCLT(Modulated Complex Lapped Transform) 기반 오디오 워터마크 알고리즘에 대한 BER 및 PEAQ(Perceptual Evaluation of Audio Quality) 성능 평가를 통해 오디오 신호 압축에 대한 워터마크의 강인성 및 워터마크 삽입에 따른 오디오 품질 열화 정도를 분석하였다. 이를 위해 오디오 신호 특성을 고려한 프로그램 장르별 시험용 방송 콘텐츠를 제작하고, Lab. Test 를 위한 DTV 송수신 시스템을 구축하였다. 오디오 인코딩 비트율 변화에 따른 성능 평가 결과, 광고 콘텐츠를 제외한 평균 BER(%)에서 192kbps 비트율이 128kbps 비트율에 비해 0.0767 더 우수한 성능을 보였다. 오디오 워터마크 삽입에 따른 객관적 음질 평가에서는 PEAQ 점수가 약 -0.2 로 원래 오디오 신호와의 품질 차이가 매우 작은 것으로 나타났으며, 또한 DTV 시스템상의 신호 압축에 의해 발생하는 오디오 신호의 품질 저하 이외에 워터마크 삽입으로 인한 추가적인 음질 저하는 거의 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

1. 서론

오디오 신호를 기반으로 데이터 삽입과 색인 기술이 융합된 AAP(Active Audioprint) 기술은 종래의 데이터 삽입 기술이 지닌 제한된 전송 데이터 양으로 인한 제공 가능한 부가 서비스의 한계를 극복하는 것은 물론, 오디오 콘텐츠의 품질 열화를 최소화하면서 전송 가능한 데이터 용량을 개선할 수 있는 새로운 기술이다.

AAP 기술은 불법으로 유통되기 쉬운 방송 및 미디어 콘텐츠의 저작권 보호를 용이하게 하고, 콘텐츠 연동형 데이터 서비스 제공을 가능하게 함으로써 다양한 신유형의 융합형 콘텐츠 제작 인프라를 제공할 수 있다. 음향채널 환경에서 발생하는 신호 왜곡에 강인한 성능을 갖는 AAP 기술 확보를 위해서는 음향 채널을 통과하지 않은 TV 혹은 라디오와 같은 1 차 단말에서 삽입된 부가 정보를 추출하는 오디오 워터마크 알고리즘에 대한 성능 분석이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 DTV 시스템을 대상으로 PN 시퀀스를 이용한 MCLT 기반의 오디오 워터마크 알고리즘에 대한 BER 및 PEAQ 성능 평가를 통해 오디오 신호 압축에 대한 워터마크의 강인성 및 워터마크 삽입에 따른 오디오 품질 열화 정도를 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 제안한 MCLT 기반 오디오 워터마크 알고리즘을 이용한 워터마크 삽입 및 추출 방법에 대해 살펴보고, 3 절에서는 성능 분석을 위한 DTV 시스템 구성 및 실험용 오디오 콘텐츠 관련 Lab. Test 환경에 대해 설명한다. 4 절에서는 제안 알고리즘에 대한 DTV 시스템상의 BER 및 PEAQ 성능분석 결과를 보여주고, 마지막으로 5 절에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

2. MCLT 기반 오디오 워터마크 알고리즘

기존 MCLT 기반 워터마크 알고리즘 [1] - [3]의 성능 향상을 위해 본 논문에서 제안한 알고리즘의 구성도는 그림 1 과 같다. 본 절에서는 워터마크 생성 및 비트열 삽입, 그리고 비트열이 삽입된 MCLT 계수로부터 시간영역 신호를 구하는 처리 블록에 대해 설명한다.

먼저 워터마크 생성 모듈에서는 삽입할 정보(M)를 1 과 -1 로 구성된 데이터로 인코딩한다. 전송 시스템 상의 오디오 신호 압축 및 전송 시 발생할 수 있는 여러 가지 왜곡에 대한 강인성을 높이기 위해서 데이터를 n 회 반복하여 전송하는 기존 방식과는 달리, 1 과 -1 로 구성된 PN 시퀀스로 대역확산하여 비트열(D)인 워터마크를 생성한다. 이때 PN 시퀀스의 길이가 길면 워터마크 검출 강인성은 높아지지만 오디오 품질의 왜곡이 증가할 수 있고, 길이가 짧으면 음질 왜곡은 줄어드는 반면 워터마크 검출의 강인성이 저하되는 trade-off 관계에 있다. 본 논문에서는 PN 시퀀스의 길이를 7 로 정하여 성능 분석을 진행하였다.

앞서 만들어진 비트열(D)을 삽입하기 위해 오디오 신호 $x(n)$ 을 MCLT 영역으로 변환한다. 길이가 2M 인 입력 오디오 신호로부터 구한 M 개의 MCLT 계수는 식(1)과 같이 MDCT(Modified Discrete Cosine Transform)와 MDST(Modified Discrete Sine Transform) 계수로 표현할 수 있다. 여기서 W 는 윈도우, C 는 코사인, 그리고 S 는 사인 벡터를 나타내며, \mathbf{x} 는 입력 오디오 신호 $x(n)$ 을 벡터로 표현한 것이다.

$$X = X_c - jX_s = CW\mathbf{x} - jSW\mathbf{x} \quad (1)$$

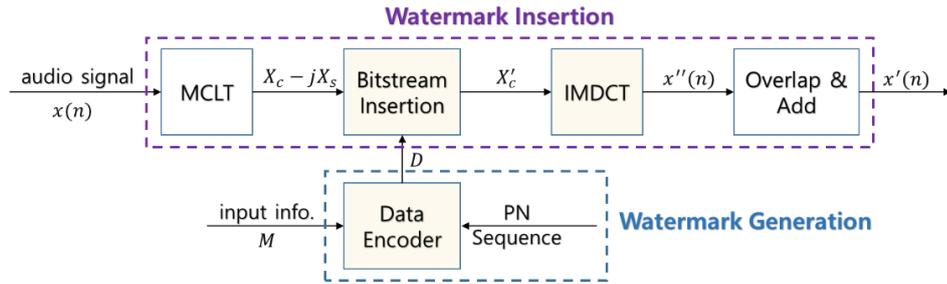


그림 1. MCLT 기반 오디오 워터마크 삽입 과정

비트열 삽입 블록에서는 식(2)와 같이 MCLT 계수에 비트를 삽입한다. 워터마크 생성 모듈의 출력인 D 는 1 과 -1 로 구성된 비트열이며, f 는 비트 열이 삽입되는 주파수 대역의 MCLT 계수 인덱스를 나타낸다.

$$X'(f) = |X(f)|D(f) \quad (2)$$

MCLT 계수에 PN 시퀀스 길이만큼의 비트열을 삽입하는 경우, 고주파 대역에 비트를 삽입하면 저비트율 오디오 코덱을 거치면서 비트 정보가 손상되므로 오디오 코덱을 통과해도 손상되지 않는 주파수 대역에 비트열을 삽입한다. 이 점을 고려하여, 본 논문에서는 6.4 k ~ 8 kHz 대역에 비트열을 삽입하였다.

MCLT 계수로부터 시간영역 신호를 생성하기 위해서는 Inverse MDCT 와 Inverse MDST 로 표현되는 IMCLT(Inverse MCLT)를 이용할 수도 있고, MCLT 계수의 실수부를 IMDCT 변환하거나 허수부에 IMDST 를 적용할 수도 있다. MCLT 기반 오디오 워터마크에서는 중첩가산으로 인해 실수부와 허수부 계수에 간섭이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 간섭의 영향을 줄이기 위해 X'_c 를 IMDCT 변환하여 시간영역 신호 $x''(n)$ 으로 변환하고 이웃 프레임 신호와 중첩 가산(overlap & add)하여 워터마크가 삽입된 오디오 신호 $x'(n)$ 을 구한다. 해당 신호는 DTV 송신 시스템을 통해 전달되는 과정에서 오디오 신호 압축 및 전송에 따른 신호 왜곡을 겪는다.

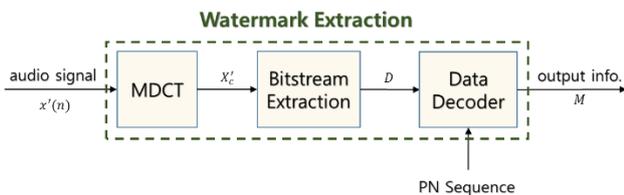


그림 2. MCLT 기반 오디오 워터마크 검출 과정

그림 2 는 제안된 MCLT 기반 워터마크 검출 방식을 나타내며, 수신된 오디오 신호 $x'(n)$ 이 워터마크 검출 모듈의 입력으로 인가된다. 먼저, 입력 오디오 신호에 대해 MDCT 를 거친 후, 워터마크가 삽입된 대역에 있는 MDCT 계수 X'_c 의 부호값을 이용하여 삽입된 비트열을 추출한다. 데이터 디코더에서는 송신단에서 사용한 PN 시퀀스와 추출된 비트열의 거리를 측정하여 1 과 -1 로 구성된 데이터를 생성하고, 이를 출력정보로 변환함으로써 삽입된 워터마크를 복원한다.

3. DTV Lab. Test 환경

제한한 MCLT 기반 오디오 워터마크 알고리즘에 대한 DTV 시스템에서의 성능 평가를 위해, 표 1 과 같이 오디오 신호 특성을 고려하여 프로그램 장르별로 시험용 방송 콘텐츠를 구분하였다. 각 장르별 콘텐츠는 표에서 보는 바와 같이 복수 개의 프로그램 혹은 단일 프로그램의 복수 회차로 구성하였으며, 이때 하나의 프로그램 혹은 회차별 콘텐츠는 대략 1 분 정도의 재생 시간을 갖도록 하였다. 이에 따라 각 장르별 콘텐츠는 총 3 분 30 초 내외 분량의 오디오 신호가 포함된 동영상으로 편집하였고, 이때 오디오 신호는 16bit 비트 해상도, 48kHz 샘플링 주파수를 갖는 stereo 채널로 구성되었다.

표 1. 시험용 방송 콘텐츠

장르	프로그램명
음악쇼	인기가요(882 회)/레드벨벳/인기가요(882 회)인피니트/원아시아페스티벌(소녀시대)
스포츠	SBS 골프(10/3 방송분)/풋볼매거진(240 회)/프로야구중계석(20 회)
어린이	꾸러기탐구생활(623 회, 627 회, 632 회)
광고	삼성 지펠 아삭, 현대차 어드밴티지 프로그램, 아이오펜, 헤라, 티스테이션, 미쟝센, 맥심 카누, 경동 나비엔, 네파, 귀뚜라미 보일러, 휴온스

DTV 실험실 시험 환경은 그림 3 에서와 같이 송신과 수신 시스템으로 구분되며, Lab. Test 환경은 SBS 에서 구축 및 운용하였다. 송신 시스템은 콘텐츠 서버, 오디오/비디오 인코더, PSIP 서버, 재다중화기 (ReMux), 8VSB 변조기로 구성되며, 이때 콘텐츠 서버는 사전 처리를 통해 오디오 워터마크가 적용된 시험용 콘텐츠를 관리 및 송출한다. DTV 시스템에서는 오디오 신호 압축을 위해 Dolby AC-3 인코더가 채택되었으며 [4], 두 가지 오디오 인코딩 비트율(128kbps, 192kbps)을 실험 조건으로 설정하였다.

수신 시스템은 DTV 수신기와 랩톱 컴퓨터로 구성되며, DTV 수신기는 8VSB 변조기 출력인 RF 신호를 입력으로 받아 복조 및 디코딩 과정을 거쳐 비디오/오디오 신호를 출력한다. 이로부터 랩톱 컴퓨터는 각각의 실험 조건에 따른 오디오 신호를 별도로 저장하고, 이에 대해 워터마크 검출 모듈을 적용하여 제안된 오디오 워터마크 알고리즘에 대한 성능 평가를 수행하였다.

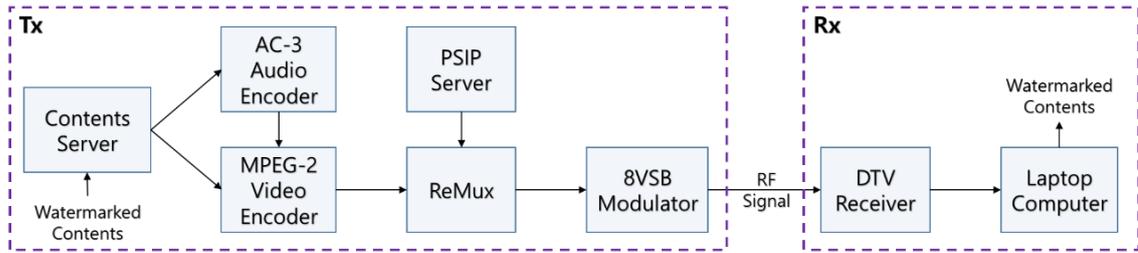


그림 3. 오디오 워터마크 DTV 송수신 시스템 구성

성능 평가 지표로 BER 과 PEAQ 를 선정하였으며, 이중 PEAQ 는 오디오 워터마크 삽입으로 인해 발생하는 오디오 품질 왜곡 정도를 측정하기 위한 지표이다[5]. PEAQ 는 사람의 청각인지 모델을 기반으로 기준 신호와 측정 신호 사이에서 추출한 여러 가지 파라미터들을 기반으로 ODG(Objective Difference Grade)를 측정하는 방법이다. ODG 값은 -4 ~ 0 사이의 값을 가지며, ODG 값이 0 인 경우는 측정 신호가 기준 신호와 동등한 음질을 갖는 것을 의미한다.

장르 콘텐츠에서 신호 압축 왜곡에 대한 강인성이 상대적으로 높다는 사실을 알 수 있다. 이는 다른 장르의 방송 콘텐츠가 3 개의 세부 콘텐츠로 구성된 것과는 달리, 광고 콘텐츠는 총 11 개의 신호 특성이 상이한 세부 콘텐츠들로 구성되었기 때문인 것으로 보인다. 광고 콘텐츠를 제외한 경우, 평균 BER(%)이 신호 압축을 덜하는 192kbps 인코딩 비트율에서는 0.0487 로, 128bps 에서는 0.1255 로 나타났다. 결과적으로 192kbps 비트율이 128kbps 비트율에 비해 0.0767 더 우수한 평균 BER(%)을 나타내었다.

4. 실험 결과

DTV 시스템에서의 제안 워터마크 알고리즘에 대한 성능 분석을 위해 그림 4 에서 보는 바와 같이 두 가지 경로에 대한 입출력 신호를 구성하였다. 입력 오디오 신호 $x(n)$ 에 대해 워터마크를 적용하지 않고 DTV 송수신 시스템을 통과시켜 얻은 출력 오디오 신호를 $y(n)$ 으로, 워터마크를 삽입해서 얻은 출력 오디오 신호를 $y'(n)$ 으로 명명하고 두 신호를 토대로 성능을 분석하였다.

입력 오디오 신호 $x(n)$ 과 워터마크가 삽입된 신호 $x'(n)$ 간 PEAQ 측정 결과는 그림 5 와 같다.

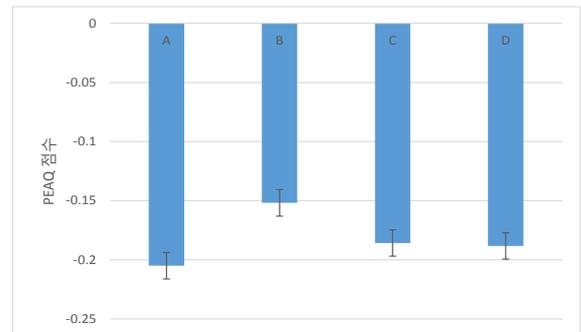
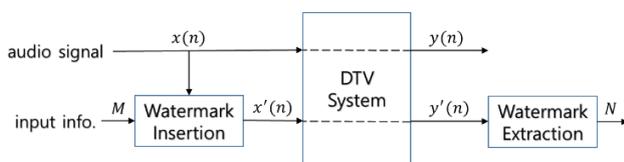
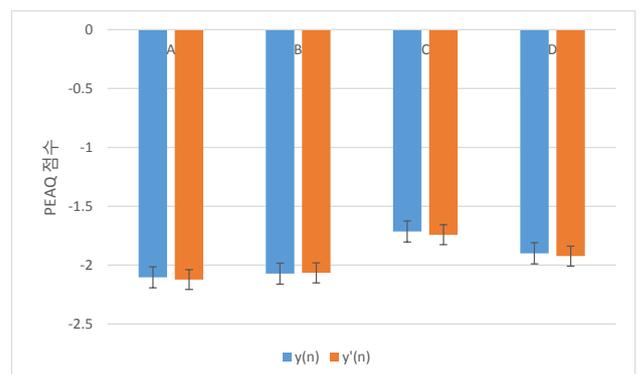


그림 5. 워터마크 삽입 신호에 대한 PEAQ 측정 결과

그림 4. 오디오 워터마크 성능 분석을 위한 입출력 신호 구성

그림에서 보는 바와 같이, 워터마크 삽입으로 인한 PEAQ 점수는 약 -0.2 로 입력 오디오 신호와의 품질 차이가 매우 작음을 알 수 있다.

오디오 신호에 삽입된 워터마크는 DTV 시스템 내 AC-3 인코더의 신호 압축에 의해 왜곡이 발생되며, 이에 대한 워터마크 강인성을 살펴보기 위해 표 2 와 같이 128kbps, 192kbps 각각의 인코딩 비트율에 따른 입력 정보 M 에 대한 BER 을 측정하였다. 이때 오디오 워터마크 알고리즘의 데이터 전송율은 93.75bps 를 기준으로 하였다.

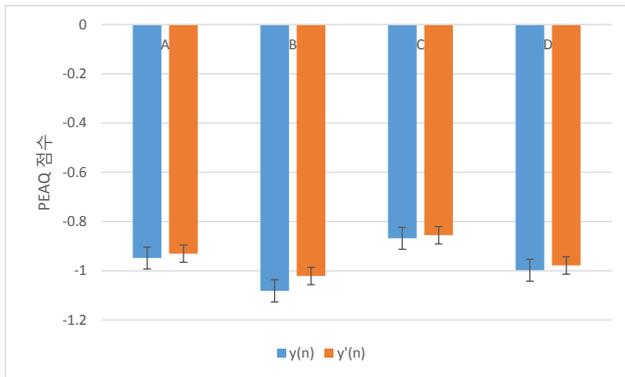


(a) AC-3 128kbps 비트율에 대한 PEQA 측정 결과

표 2. 제안 오디오 워터마크 알고리즘의 BER(%) 측정 결과

장르 비트율	음악쇼 (A)	스포츠 (B)	어린이 (C)	광고 (D)
192kbps	0.0679	0.0286	0.0497	0.7898
128kbps	0.1552	0.1144	0.1068	0.7751

표 2 에서 보는 바와 같이, 광고 콘텐츠를 제외한 나머지



(b) AC-3 192kbps 비트율에 대한 PEAQ 측정 결과

그림 6. DTV 오디오 인코딩을 변화에 따른 PEAQ 측정 결과

입력 오디오 신호 $x(n)$ 과 이 신호를 DTV 시스템에 통과 시켜 얻은 $y(n)$, 그리고 워터마크가 삽입된 오디오 신호 $x'(n)$ 과 이 신호를 DTV 시스템을 통과 시켜 얻은 $y'(n)$ 간의 PEAQ 측정 결과는 그림 6 과 같다. 측정 결과에서 알 수 있듯이, DTV 시스템상의 신호 압축에 의해 발생하는 오디오 신호의 품질 저하 이외에 워터마크 삽입으로 인한 추가적인 음질 저하는 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존 MCLT 기반 워터마크 알고리즘의 성능을 개선하기 위해 PN 시퀀스를 이용한 새로운 워터마크 알고리즘을 제안하고, DTV 시스템을 대상으로 이에 대한 BER 및 PEAQ 성능을 분석하였다.

제안한 워터마크 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 오디오 신호 특성을 고려하여 프로그램 장르별로 시험용 방송 콘텐츠를 제작하고, Lab. Test 를 위한 DTV 송수신 시스템을 구축하였다. DTV 시스템에서의 오디오 인코딩 비트율 변화에 따른 신호 왜곡에 대한 강인성과 워터마크 삽입에 따른 오디오 품질 열화 정도를 분석하기 위한 평가 지표로 각각 BER 과 PEAQ 를 사용하였다.

오디오 인코딩 비트율 변화에 따른 성능 평가 결과, 광고 콘텐츠를 제외한 평균 BER(%)에서 192kbps 비트율이 128kbps 비트율에 비해 0.0767 더 우수한 성능을 보였다. 오디오 워터마크 삽입에 따른 객관적 음질 평가에서는 PEAQ 점수가 약 -0.2 로 원래 오디오 신호와의 품질 차이가 매우 작은 것으로 나타났다. 또한 DTV 시스템상의 신호 압축에 의해 발생하는 오디오 신호의 품질 저하 이외에 워터마크 삽입으로 인한 추가적인 음질 저하는 거의 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 2017 년도 한국전자통신연구원(ETRI)의 지원을 받아 수행하였으며(17ZR1200, 미디어 접근편의성 향상을 위한 Active Audioprint 기술 개발), 시험용 방송 콘텐츠 제작 및 DTV 실험실 시험 환경 구축 등에 많은 도움을 주신 SBS

박재현 차장님과 김영운 연구원님께 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌

- [1] H. Malvar, "A modulated complex lapped transform and its applications to audio processing," in Proc. IEEE ICASSP'99, pp.1421-1424, May 1999.
- [2] D. Kirovski and H. Malvar, "Spread-spectrum watermarking of audio signals," IEEE Trans. Signal Process., vol.51, no.4, pp.1020-1033, Apr. 2003.
- [3] X. Dai and M.D. Wagh, "Fast Algorithm for Modulated Complex Lapped Transform," IEEE Signal Processing Letters, vol.16, no.1, pp.30-33, Jan. 2009.
- [4] TTA, TTAS.KO-07.0014/R3, "지상파 디지털 TV 방송 송수신 정합 표준," 2010.12.
- [5] ITU-R Rec. BS.1387-1, "Method for Objective Measurements of Perceived Audio Quality," International Telecommunications Union, Nov. 2001.