

이미지 전송 성능 향상을 위한 Sobel 기반 UEP-OFDM 시스템 설계

전예림, 조희선, *문태한, 이호원

아주대학교 전자공학과, *아주대학교 AI융합네트워크학과
{yelimjun0303, heeseun9351, *ansxogks3, howon}@ajou.ac.kr

Improving Image Transmission Performance via Sobel-Based UEP-OFDM System Design

Yelim Jun, Heeseon Cho, Taehan Moon*, Howon Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University,
*Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University.

요약

본 논문은 열악한 채널 잡음 환경에서 이미지 전송 시 주요 윤곽 정보의 손실을 최소화하기 위해 Sobel 필터 기반의 차등 에러 보호 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 전송 시스템을 제안한다. 실험 결과를 통해, 기존의 균등 에러 보호 방식 대비 Bit Error Rate (BER)이 66.2% 개선되어, 잡음 환경에서도 시각 정보를 유효하게 보존함을 입증한다.

I. 서론

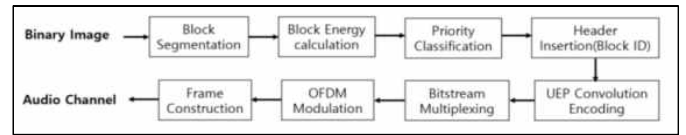
본 논문은 무선 통신 기술 중에서도 스피커와 마이크만을 활용하여 데이터를 전송하는 음향 통신 시스템을 고려한다. 음향 채널은 가용 대역폭이 매우 제한적이고, 소음으로 인한 신호 왜곡에 취약한 특성을 갖는다. 이를 극복하기 위해 좁은 대역폭 내에서도 대역 효율을 보장하고, 채널 왜곡에 강인한 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 전송 방식을 사용한다. 그러나 모든 비트를 균일하게 보호하는 Equal Error Protection (EEP) 구조에서는 OFDM 기법을 적용하더라도 데이터의 시각적 중요도와 무관하게 채널 오류가 발생하는 문제가 존재한다. 이러한 구조적 한계를 극복하기 위해, 데이터의 시각적 중요도에 따라 차등적인 보호를 제공하는 불균등 오류 보호 기법이 주목받고 있다 [1].

본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 이미지 콘텐츠의 시각적 중요도를 고려하는 Unequal Error Protection (UEP) 방식을 제안한다. 제안하는 시스템은 Sobel 필터를 이용하여 이미지 블록별 edge energy를 추출하고, 부호율을 차등 할당한다. 이를 통해 제한된 대역폭 내에서 시스템의 전송 효율과 복원 이미지의 품질을 동시에 최적화한다.

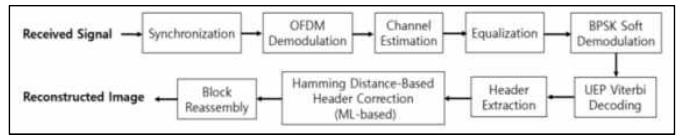
II. 음향 통신 시스템 모델

본 논문에서 제안하는 음향 통신 시스템의 상세 구조는 그림 1과 같다. 송신단은 입력 이미지를 블록 단위로 분할하여 처리한다. 각 블록은 edge energy 기반의 중요도 분류 과정을 거치며, 그 결과에 따라 차등적인 채널 코딩을 적용하는 UEP 기법이 수행된다. 부호화된 데이터는 Binary Phase Shift Keying (BPSK) 변조를 거친 뒤, 심볼 간의 간섭을 억제하기 위한 Cyclic Prefix (CP)와 프레임 동기화용 preamble이 결합된 OFDM 전송 프레임으로 구성된다.

수신단은 먼저 preamble 기반의 동기화를 통해 수신 신호 내 프레임의 시작점을 검출하고, OFDM 복조 및 파일럿 기반의 채널 추정을 수행한다. 이어 추정된 채널 정보를 바탕으로 Zero-Forcing 등화기를 적용하여 채널에 의한 신호 왜곡을 보정한다. 마지막으로 Soft-decision



(a) 송신기 구조도



(b) 수신기 구조도

그림 1. 음향 통신 시스템 모델

Viterbi 복호와 Maximum Likelihood (ML) 기반 헤더 보정을 진행한다. 이 과정을 통해 잡음 환경에서 이미지 블록의 배치 오류를 방지하고, 최종적으로 원본에 근접한 이미지를 복원한다.

III. UEP-OFDM 기반 차등 부호화 및 복호 알고리즘

기존의 EEP-OFDM 방식은 시각 시스템이 민감하게 반응하는 edge 정보를 효과적으로 보호하지 못한다. 이를 개선하기 위해 본 시스템은 Sobel 필터 기반 블록별 UEP 및 ML 헤더 보정 알고리즘을 제안한다. 본 기법은 시각적 중요도가 높은 edge 영역에 오류 정정 능력을 차등 할당하여 복원 성능을 강화하는 방식이다 [2].

대상인 각 이미지 블록은 중요도 산출을 위해 픽셀 간의 밝기 변화량 분석 과정을 거친다. 일반적으로 edge가 뚜렷한 부분일수록 주변 대비 밝기 변화량이 크기 때문에, Sobel 연산자를 통해 시각적으로 중요도가 높은 구조적 영역을 검출한다. 이때 각 블록 내 밝기 변화의 강도를 나타내는 gradient energy E_k 는 아래와 같이 정의한다.

$$E_k = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} (|G_x(x,y)| + |G_y(x,y)|), \quad (1)$$

G_x 와 G_y 는 각각 수평 및 수직 방향의 밝기 변화율을 나타내며, N 은 블

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameter	Value	Parameter	Value
샘플링 주파수	5,000Hz	부반송파 수	256
변조 방식	BPSK	CP 블록 크기	32
이미지 크기 (픽셀)	128×128	블록 크기 (픽셀)	16×16

록의 한 변을 구성하는 픽셀의 수이다. 즉, gradient energy E_k 는 L_1 -norm 기반의 gradient magnitude 근사값의 총합으로 정의된다.

본 논문에서 제안한 시스템은 산출된 energy의 크기를 기준으로 상위 30%의 블록을 High Priority (HP) 그룹으로 분류하여 1/3 부호율을 적용한다. 그 외의 블록들은 Low Priority (LP) 그룹으로 분류하여 puncturing 기법을 통해 1/2 부호율을 적용한다. Puncturing 과정에서는 연속된 두 시점의 출력 비트 중 puncturing pattern에 따라 특정 비트를 소거함으로써, 제한된 대역폭 내에서 전송 효율을 최적화한다. UEP에 사용되는 컨볼루션 부호화기는 시프트 레지스터 구조이다. 해당 구조는 입력 정보 비트열과 생성 다항식의 컨볼루션 연산을 통해 최종적인 부호화 비트를 생성한다. 이때 시간 n 에서 생성된 컨볼루션 부호 출력 비트 $v_i[n]$ 을 아래와 같이 정의한다.

$$v_i[n] = \bigoplus_{k=0}^m g_i[k]u[n-k], \quad (2)$$

n 은 시간 인덱스를 의미한다. 입력 비트 $u[n]$ 에 대한 출력 비트 $v_i[n]$ 는 생성 다항식 $g_i[k]$ 에 따라 현재 입력과 과거 m 개의 메모리 입력 비트를 XOR 연산으로 결합하여 정의된다.

잡음이 심한 음향 채널 환경에서 이미지 블록의 배치 정확성을 높이기 위해 해밍 거리 기반의 헤더 보정 알고리즘을 도입한다. 수신단은 복호화 후 추출된 헤더 정보를 유효 헤더 테이블과 비교 분석하며, ML 기준에 따라 가장 유사한 유효 인덱스를 선택함으로써 블록 배치를 최적화한다. 특히 계산된 해밍 거리가 2비트를 초과할 때 해당 블록을 제거하는 임계값 필터링을 적용하여, 헤더의 중복 및 과도한 블록 폐기를 방지한다. 수신 헤더와 유효 헤더 간 해밍 거리 d_H 는 아래와 같이 정의한다.

$$d_H(\hat{h}, h_i) = \sum_{k=1}^L |\hat{h}_k - h_{i,k}|, \quad (3)$$

L 은 헤더의 비트 길이를 의미한다. \hat{h}_k 는 수신된 헤더의 k 번째 비트를 의미하고, $h_{i,k}$ 는 인덱스 번호 i 에 대응하는 이상적인 헤더 비트를 나타낸다.

IV. 시뮬레이션 및 성능 분석

본 논문에서는 송수신기 각 1대를 활용한 UEP 구조를 기반으로 하며, 제안하는 시스템 모델의 성능 검증은 실제 음향 채널 환경에서 이루어졌다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같으며, 성능 평가는 Bit Error Rate (BER)와 시각적 품질을 주요 지표로 설정하여 수행하였다.

송신단은 데이터 처리의 효율성을 위해, 128×128 픽셀 해상도의 이미지를 64개의 균일 블록으로 분할한다. 각 블록에는 수신단에서의 위치 식별 및 재구성을 위한 고유 헤더를 부여한다. 이후 각 블록의 gradient energy를 산출하여 HP와 LP 그룹으로 분류한다. 분류 및 변조가 완료된 데이터는 부반송파에 매핑되어 OFDM 심볼을 형성한다. 최종적으로 생성된 디지털 신호는 아날로그 음향 신호로 변환되어 스피커를 통해 송신된다.

제안한 시스템의 복원 성능은 그림 2(a)를 대조군으로 하여 비교 분석하였다. 기존의 EEP-OFDM의 방식은 해밍 부호 및 Soft-decision 기법을 결합한 채널 부호화 기법을 사용하였다. 시뮬레이션 결과, 그림 2(b)에서 복원된 이미지의 BER이 0.139771로 측정되었으며, 이미지 복원 과

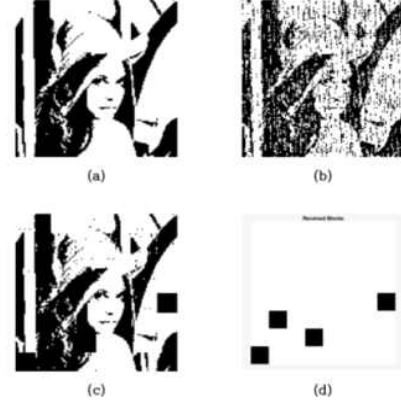


그림 2. 무선 통신 환경에서의 성능 분석 (a) 송신된 원본 이미지, (b) 해밍 채널의 복원 이미지, (c) 제안한 시스템 모델의 복원 이미지, (d) 헤더 검증을 통과한 수신 블록 분포

정에서 잡음의 영향으로 정보 손실이 발생하였음을 확인하였다.

이와 대조적으로, 제안하는 시스템을 적용한 그림 2(c)의 복원 결과는 0.0472의 BER을 기록하였다. 이는 기존 방식 대비 BER이 66.2% 개선된 수치로, 시스템의 성능 향상을 입증하는 결과이다. 특히 그림 2(d)에서 헤더 보정 알고리즘 적용 후의 수신 블록 내의 유효 BER은 0.0178이 측정되었다. 이를 통해 HP 블록에 집중된 오류 정정 능력과 LP 블록에 적용된 puncturing 기반의 전송률 제어가 통신 속도와 복원 품질을 동시에 만족하는 핵심 요소로 작용함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 이미지 블록의 Sobel gradient energy를 기반으로 부호화율을 차등 할당하는 UEP 기반 OFDM 음향 통신 시스템을 설계하였다. 시각적 중요도가 높은 edge 영역에 낮은 부호율을 할당하여 전송 신뢰성을 확보하였으며, 수신단에서는 Soft-decision Viterbi 복호와 헤더 기반 오류 보정 알고리즘을 적용하여 복호 성능을 극대화하였다. 가정 주파수 대역의 실제 음향 채널 환경에서 성능을 분석한 결과, 기존 방식 대비 BER이 66.2% 개선되는 유의미한 성과를 거두었다. 특히 주요 구조 정보를 효과적으로 보존함과 동시에, puncturing 기법을 적용함으로써 전송 효율과 복원 품질 사이의 균형을 달성하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. RS-2025-02303435)과 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(No. RS-2024-00396992)과 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2025-00563401)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] U. S. Mohammed and H. A. Hamada, "Image transmission over OFDM channel with rate allocation scheme and minimum peak-to-average power ratio," *Journal of Telecommunications*, vol. 2, no. 2, pp. 70–77, May 2010.
- [2] Y. Yatawara, M. Caldera, T. M. Kusuma, and H.-J. Zepernick, "Unequal error protection for ROI coded images over fading channels," in *Proc. Syst. Commun.*, Montreal, QC, Canada, Aug. 2005, pp. 295–300.