

2.4kbps EHSX 음성부호화기와 결합된 채널코딩 방법

Design of Channel Coding Combined with 2.4kbps EHSX Coder

이창환*, 김영준**, 이인성**
LG 전자*, 충북대학교 전자정보대학**

Chang-Hwan Lee(changhwan.lee@lge.com), Young-Joon Kim(cbnu045@naver.com),
In-Sung Lee(inslee@chungbuk.ac.kr)

요약

본 논문에서는 2.4kbps EHSX 음성코더와 결합된 채널 코딩 방법을 제안한다. 채널 코더의 부호율은 1/2로 하였고, 그에 따라 부호율이 1/3인 convolutional 코더를 평치링(puncturing)함으로써 부호율을 맞추었다. 채널 코더의 부호율을 1/3에서 1/2로 하기 위한 평치링에 소스 부호화된 비트들의 중요도를 고려하여 채널 코딩을 수행할 때 성능 향상을 얻도록 하였다. 소스 코더로 사용된 EHSX 코더의 부호화된 비트들의 중요도는 4명의 여성과 남성으로 구성된 음성을 사용하여 분석하였고, 실험 결과, EHSX 코더가 출력하는 부호화된 비트들은 서로 다른 비트 에러 감응도(sensitive)를 가짐을 알 수 있었다. 소스 코더와 결합된 채널 코더의 성능 평가를 위한 모의 실험은 Rayleigh 페이딩 채널과 AWGN 채널 상에서 수행되었으며, 제안된 방법을 통해 MOS 0.25~0.35 정도의 성능 향상을 이루었다.

■ **중심어** : | 음성부호화 | 채널부호화 | 김쌘부호화기 |

Abstract

We propose the efficient channel coding method combined with a 2.4kbps speech coder. The code rate of a channel coder is given by 1/2 and 1/2 rate convolutional coder is obtained from the punctured convolutional coder with rate of 1/3. The punctured convolutional coder is used for a variable rate allocation. The puncturing method according to the importance of the output data of the source encoder is applied for the convolutional coder. The importance of output data is analyzed by evaluating the bit error sensitivity of speech parameter bits. The performance of proposed coder is analyzed and simulated in Rayleigh fading channel and AWGN channel. The experimental results with 2.4kbps EHSX coder show that the variable rate channel coding method is superior to non-variable channel coding method from the subjective speech quality.

■ **keyword** : | Speech Coding | Channel Coding | Convolutional Coder |

1. 서론

채널 코더와 소스 코더의 결합에 있어서 최적의 방법을 찾는 연구는 Shannon이 정보 이론을 정립할 당시부

터 제기된 문제로서 이론적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 이론적으로 도출된 최적의 소스/채널 코더는 모델이 복잡하고 시간적으로 파라미터 값이 변하는 실제 음성에서 잘 적용되지 못한다. 따라서 각 소스

* 이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

접수번호 : #100630-001

접수일자 : 2010년 06월 30일

심사완료일 : 2010년 08월 11일

교신저자 : 이인성, e-mail : inslee@chungbuk.ac.kr

코더의 종류와 방식에 따라 실험적인 최적 소스/채널 결합 방법이 연구되어 왔다[1][2]. 기존의 채널 코더가 부호율이 1/2인 Convolutional 코더를 사용하는데 비하여, 본 논문에서는 소스 코더의 출력 데이터에 대한 비트 에러 감응도에 따라 차등적으로 채널 코딩을 수행함으로써 성능을 향상 시켰다.

소스 코더로는 4kHz의 대역폭의 음성신호를 2.4kbps 비트율을 갖는 음성데이터로 변환하는 부호화 방법을 제공하는 EHSX(Enhanced Harmonic Stochastic Excitation) 코더를 사용한다. EHSX 코더는 유/무성음에 따라 유성음 구간에서는 하모닉 여기 부호화 방법(Harmonic Excitation Coding)을 사용하며, 무성음 구간에서는 CELP 부호화 방법(CELP based Coding)을 선택적으로 사용한다. 또한 이와 결합된 채널 코더로는 현재 CDMA에서 사용하고 있는 Convolutional 코더와 Viterbi 디코더를 사용하였다.

소스 부호화된 비트들의 중요도는 각 비트들의 채널 에러에 대한 감응도를 측정하여 결정하며, 이 정보는 Convolutional 코더의 부호율을 1/3에서 1/2로 하기 위한 평처링에 적용한다. 또, 비트별 에러감응도를 고려하여 평처링하는 방법과 소스 부호화된 비트들의 특성과 관계없이 채널 코딩하는 방법의 성능을 Rayleigh 페이딩 채널과 AWGN 채널 상에서 비교하여 본다. 실험 과정에서의 모든 음질 테스트는 주관적 음질평가인 MOS(Mean Opinion Score)를 사용하였다.

본 논문의 2장에서는 EHSX 코더에 대한 알고리즘을 설명하며, 3장에서는 채널 코딩 방법으로 사용한 RCPC

코더에 대해 설명한다. 4장에서는 소스 부호화된 비트들의 중요도를 분석하였으며, 이에 따른 평처링 방법을 설명한다. 5장에서는 모의 실험을 통해 성능을 비교하며, 6장에서는 결론을 맺는다.

II. EHSX speech coder

EHSX 코더는 4kHz의 대역폭을 갖는 음성신호를 2.4kbps의 비트율을 갖는 음성데이터로 변환하는 부호화 방법이다. 또한 유성음/무성음에 따라 하모닉 여기 부호화 방법과 CELP 부호화 방법을 선택적으로 사용하는 구조로 구성되며, 묵음구간 부호화 방법도 제공한다. EHSX 코더의 프레임 구간은 20ms이며, 8kHz 샘플률로 160 샘플단위로 분석 및 합성을 수행한다. 분석을 위한 미래샘플은 48 샘플이 이용된다.

전체적인 부호화 과정은 [그림 1]과 같다. 부호화 과정은 LPC 분석과정과 LPC 잔여신호를 각 모드에 따라 분석하는 과정으로 분류된다. 여기에 LPC 계수는 LSP(Line Spectral Pair)로 변환된 다음, 전통적 2단계 벡터양자화와 Inter-frame 벡터양자화 중 양자화 에러가 더 적은 것으로 양자화 된다. 그런 다음 양자화 된 LSP 계수를 보간하여 입력 음성신호를 역 LPC 필터링함으로써 잔여 신호를 추출하게 된다. 이 때 추출된 잔여신호는 유/무성음과 진이 구간을 판별하는 분류기에 의해 분류되며, 각 대응 코더에 의해 부호화된다. 여기서, 유/무성음 모드 값과 이에 따른 각 코더의 파라미터

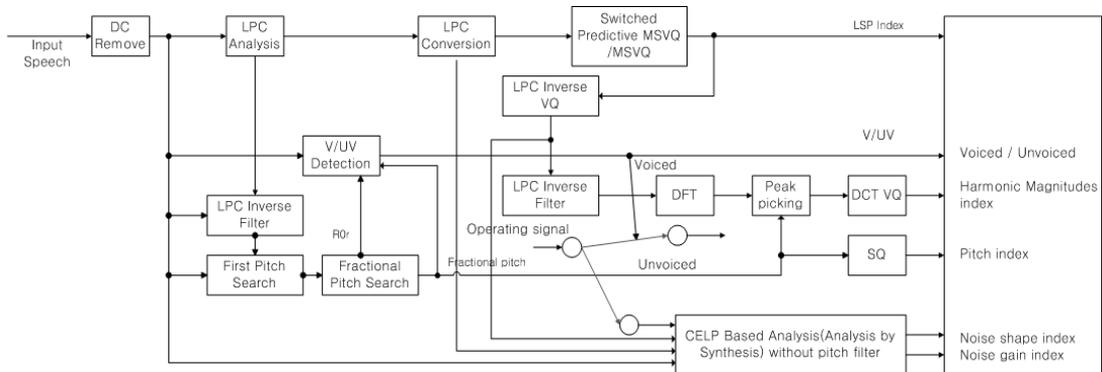


그림 1. EHSX 부호화기 블록다이어그램

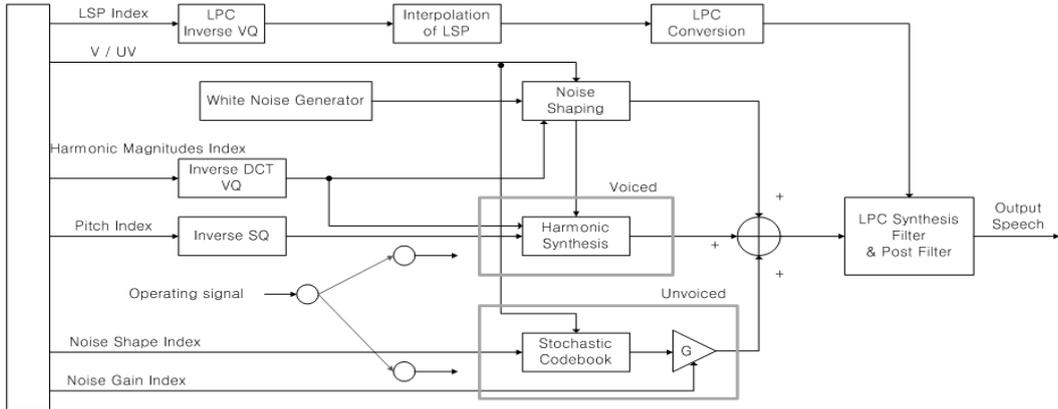


그림 2. EHSX 복호화기 블록다이어그램

값, 그리고 LSP 인덱스가 디코더에 전송된다. 인코딩 과정에서의 피치는 1차 피치검색 과정과 분수(Fractional) 피치검색 과정을 거쳐 최종 피치 주기를 구한다. 예측된 피치 주기 값은 유/무성음 모드를 결정하기 위해 사용된다.

EHSX 복호화 과정은 [그림 2]와 같다. 복호화 과정에서는 스펙트럴 외형 정보를 나타내는 LSP 파라미터, 유/무성음 모드와 여기신호 파라미터를 전송 받아 합성 과정을 수행한다. 여기서 LSP는 역 양자화를 거쳐 보간되며, 모드에 따라 여기신호 파라미터는 각각 다른 합성 과정을 거친다. 모드가 유성음일 경우 하모닉 및 노이즈 합성 과정을 거치며 무성음일 경우 확률적 합성 과정만을 수행한다. 여기서 합성된 여기신호는 최종적으로 LPC 합성 필터를 통과한 후 후단 여파기를 통과함으로써 최종 복원된 음성을 얻게 된다.

III. RCPC coder

Convolutional 코더는 잡음이 있는 환경에서 디지털 통신 성능을 향상시키는 FEC(Forward error correction) 코더로서 k 비트의 정보에 대하여 n 비트의 부호어를 발생시키며 부호율 R은 식(1)과 같다[3][4].

$$R = k/n \quad (1)$$

소스 코더에서의 출력 데이터는 채널 에러에 대하여 감응도가 다르게 나타나기 때문에 에러에 대한 감응도가 낮은 데이터는 채널 코더의 부호율을 낮춰 전송하고, 에러에 대한 감응도가 높은 데이터는 부호율을 높임으로써 전체 전송율을 조절할 필요가 있다. 이를 위해 RCPC(Rate Compatible Punctured Convolutional) 코더를 이용한다.

RCPC 코더는 Convolutional 코더를 기반으로 하여 평처링 법칙에 의해 소스코더의 출력 데이터 특성에 따라 차등적으로 부호율을 조절하며, 디코더로는 Viterbi 디코더를 이용한다[3][5]. [그림 3]은 Rate R이 1/2이고 메모리가 2인 Convolutional 코더를 기반으로 하는 RCPC 인코더를 나타낸 것이다.

Convolutional 인코더는 각 시간마다 ±1의 값이 입력되어지고 인코더의 출력 X_1, X_2 출력 또한 ±1의 값을 갖는다. [그림 3]에서 이 출력 심볼은 주기 $p=4$ 인 평처링 법칙을 따른다. 그리고 평처링 테이블에서의 0은 코드 심볼이 전송되지 않음을 의미하며 1일 때에는 코드 심볼이 전송되는 것을 의미한다. [그림 3]에서 평처링 법칙 a(1)인 경우를 보면 시간 j 가 1일 때 각각의 심볼은 전송되어지지만 j 가 2와 3, 그리고 4일 경우에는 X_{12}, X_{13} 그리고 X_{24} 일 때만 전송되어지며, X_{22}, X_{23} 그리고 X_{14} 일 때는 전송되어지지 않는다. 그리고 평처링 법칙은 p 주기를 갖고 반복되어 진다. 이렇게 하여 4/5 Rate 코더는 원래의 1/2 Rate 코더에서 나오게 된

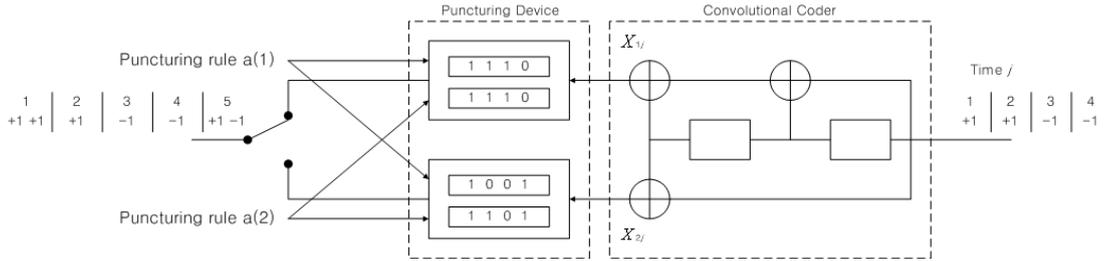


그림 3. RCPC 코더(Rate 4/5, 2/3)

다. 평처링 테이블은 $(n \times p) = (2 \times 4)$ 배열로 나타내며, 식 (2)와 같다.

$$a(1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2/3 Rate 코더는 보다 높은 Rate인 4/5 Rate 코더와 양립성을 지니기 위해서는 4/5 Rate 코더와 같은 순서의 비트는 전송되어야 하며, 평처링 테이블은 식 (3)과 같다.

$$a(2) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

일반적으로 Rate가 $1/n$ 인 기본 코더의 평처링 된 코더의 부호율은 식 (4)와 같고, 그 때의 p 는 평처링 주기를 나타낸다.

$$R = \frac{p}{p+l} \quad l = 1, \dots, (n-1)p \quad (4)$$

RCPC로 채널 코딩된 신호의 가장 적합한 디코딩 방법은 Viterbi 알고리즘이다. [그림 3]에서 주어진 메모리 M 이 2이고 Rate 4/5인 RCPC 코더와 대응되는 Viterbi 디코더의 trellis도는 [그림 4]에 나타나 있다.

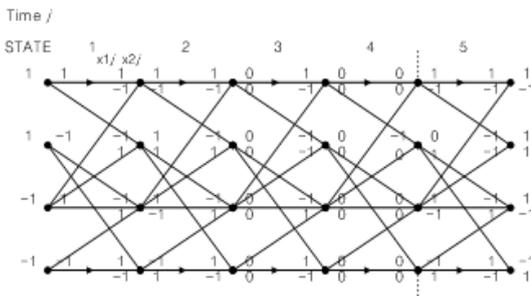


그림 4. Viterbi 디코더의 trellis(R=4/5)

Viterbi 알고리즘에서 최적의 경로는 식 (5)에서 주어진 최대 유사도 순열 거리(likelihood sequence metric)를 계산함으로써 얻을 수 있다.

$$\max_m \sum_{j=0}^l \lambda_j^m \quad (5)$$

Trellis 깊이 j 에서 2^j 개의 모든 가능한 경로의 최대 유사도 순열 거리의 값을 계산하고 이때 최대값을 갖는 경로가 결정되며 이 값을 디코딩 경로로 결정한다. 이때 λ_j^m 은 시간 j 에서 trellis에서의 경로 m 에 대한 metric 증가분을 나타내며 식 (6)과 같다.

$$\lambda_j^m = \sum_{i=1}^N a_{ij} x_{ij}^m y_{ij} \quad (6)$$

여기서 a_{ij} 는 평처링 테이블의 요소들이고, x_{ij}^m 는 경로 m 에 대한 j 가지의 i 번째 비트의 trellis 심볼 ± 1 이고, y_{ij} 는 경판정(hard decision) 또는 연판정(soft decision) 형태의 수신된 값들을 의미한다. 수신된 신호의 경판정 형태의 y_{ij} 는 ± 1 값으로 결정되고 양자화 되지 않은 연판정 형태로 수신된 y_{ij} 는 실수 값을 갖는다.

IV. 소스 부호화된 비트들의 중요도 분석과 평처링 방법

소스 부호화된 비트들의 중요도를 분석하는 기준은 주관적 음질평가 방법인 MOS test 값을 이용한다. 중요도 분석을 위해 소스 부호화된 데이터의 각 비트에 에러를 발생시킨 후 EHSX 코더로 다시 복호화된 음성 출력의 MOS test 값을 측정하였다. EHSX 코더의 비트 할당은 [표 1]에서 나타내었다.

표 1. 2.4kbps EHSX 코더의 비트 할당

10차 LSP 양자화 값	16 비트		
V/UV	1 비트		
Excitation 관련 인덱스 값	무성음		유성음
	10ms	형태0 : 8 비트	피치 : 7 비트
		이득0 : 4 비트	
	10ms	형태3 : 8 비트	하모닉 관련 파라미터 : 24 비트
		이득3 : 4 비트	
잔여비트 : 7 비트			
총 비트수	48 비트		

표 2. EHSX 코더의 비트 순서

비트 순서	유성음	비트 순서	무성음
1	idvsp[0]	1	idvsp[0]
2			
3			
4			
5			
6			
7	vuv	7	vuv
8			
9	idvsp[2]	9	idvsp[2]
10			
11			
12	idvsp[1]	12	idvsp[1]
13			
14			
15			
16			
17	pitch	17	idu[1]
18			
19			
20			
21			
22	idu[0]		
23			
24	idvsp[3]	23	idvsp[3]
25			
26	idv[2]	24	idvsp[2]
27			
28	idv[1]	25	idu[2]
29			
30			
31			
32	pitch	26	idu[1]
33			
34			
35			
36			
37	idv[3]	32	idu[3]
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			

38	idv[2]	38	idu[2]
39			
40			
41	idv[8] (residual)	41	reserved
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
			idu[3]

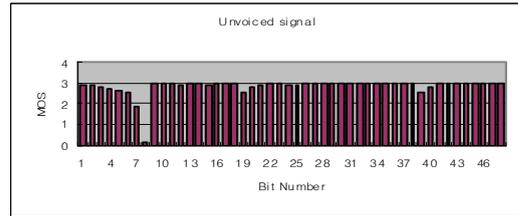
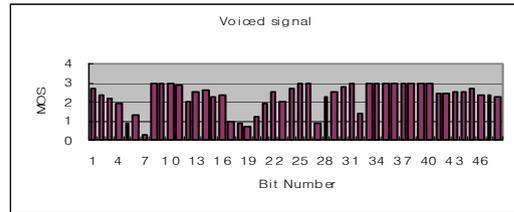


그림 5. 소스 부호화된 비트의 에러 감응도

EHSX 코더는 유성음 구간과 무성음 구간에 따라 처리 방식이 다르기 때문에 파라미터에 따라 쓰이는 위치가 달라진다. 따라서 유성음과 무성음 구간을 구분하여 평치평을 다르게 하도록 하였다. 유성음과 무성음 구간에서의 소스 부호화된 비트 순서는 [표 2]에 나타내었다. MOS test 실험에서 전송 에러에 민감한 비트와 강한 비트 사이의 MOS test 값은 2.8 정도로 심한 차이를 나타내었고, 실험 결과는 [그림 5]에 나타내었다.

채널 코딩의 부호율은 1/2이지만 여러 부호율을 갖는 코더를 구현하기 위해 부호율 $R=1/3$ 을 기본으로 하는 Convolutional 코더를 사용한다. 구속장(Constraint length)은 NASA에서 사용하는 $K=7$, IS-95 CDMA에서 사용하는 $K=9$ 두 가지로 하였으며, 생성다항식을 위한 채널 인코더의 코드벡터는 $K=9$ 일 때 식 (7), $K=7$ 일 때 식 (8)과 같다[3][6].

$$\vec{G} = \begin{bmatrix} g(1) \\ g(2) \\ g(3) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1111101101 \\ 1100110111 \\ 1001001111 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\vec{G} = \begin{bmatrix} g(1) \\ g(2) \\ g(3) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 10011111 \\ 10101111 \\ 11011101 \end{pmatrix} \quad (8)$$

표 3. RCPC 코더의 비트 할당과 부호율

	Rate당 비트수
Case 1	all 1/2 Rate 56bits
Case 2	4/10 Rate 16bits, 1/2 Rate 24bits, 2/3 Rate 16bits
Case 3	1/3 Rate 8bits, 1/2 Rate 32bits, 2/3 Rate 16bits

채널코더의 입력은 20ms 음성 프레임당 48비트의 음성코더의 출력 데이터이다. 입력 데이터는 MOS 값에 의해 정리된 중요도에 따라 부호율을 변화 시킬 수 있도록 3개의 그룹으로 나누었다. 채널 코더는 각 그룹에 따라 다른 부호율을 가지며, 전체 부호율은 Rate 1/2로 맞추었다. 그룹당 비트수와 부호율은 [표 3]에 나타내었으며, 1/3 Rate Convolutional 코더를 기본으로 한 각각의 Rate에 따른 평처링 법칙은 식 (9), (10), (11)과 같다.

$$Rate \frac{2}{3} = \begin{bmatrix} 11111111 \\ 10101010 \\ 00000000 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Rate \frac{1}{2} = \begin{bmatrix} 11111111 \\ 11111111 \\ 00000000 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Rate \frac{4}{10} = \begin{bmatrix} 11111111 \\ 11111111 \\ 11001100 \end{bmatrix} \quad (11)$$

V. 모의 실험 결과

소스 코더와 결합된 채널 코딩의 성능 평가를 위해 채널 코딩을 위한 실험 환경을 구성하였다. 채널 환경은 AWGN 환경과 Rayleigh 분포를 갖는 페이딩 채널에서 실험하였다. Rayleigh 분포를 갖는 페이딩 채널의 시뮬레이터 블록다이어그램은 [그림 6]과 같다.

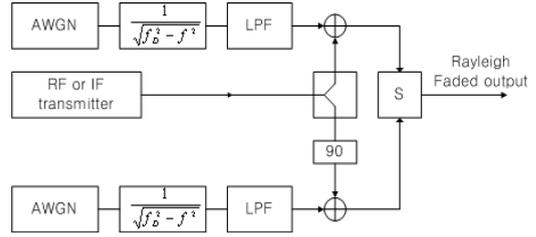


그림 6. 페이딩 채널의 시뮬레이터 블록 다이어그램

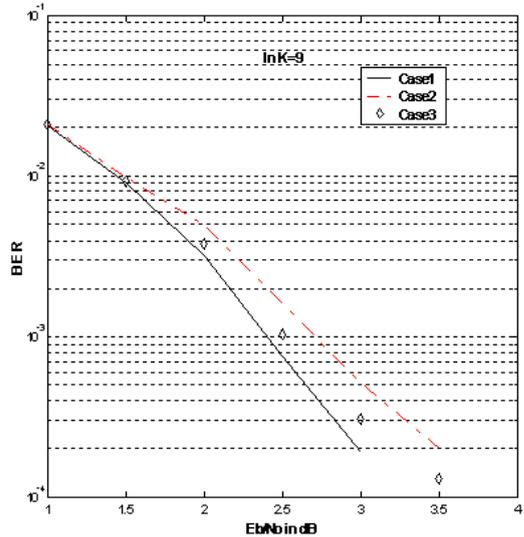
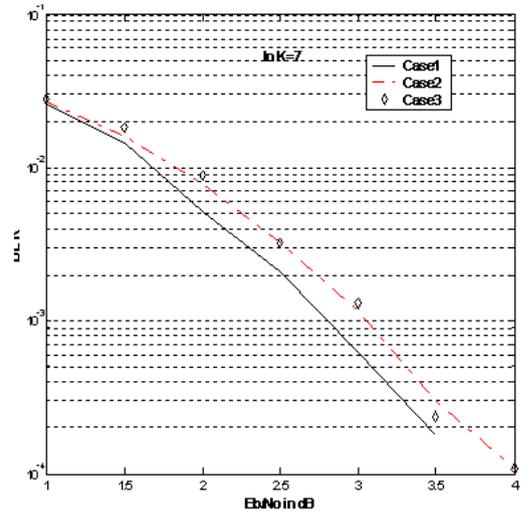


그림 7. AWGN 환경에서의 BER

먼저 채널 코더의 성능을 평가하기 위해 BER을 측정하였다. [그림 7]의 AWGN 환경 시뮬레이션에서는 2dB의 E_b/N_0 에서 10^{-2} 정도의 BER을 모든 RCPC 코더에서 얻었고, 3dB의 E_b/N_0 에서는 10^{-3} 정도의 BER을 얻었다. [그림 8]의 다중경로 페이딩 채널환경 시뮬레이션에서는 10dB의 E_b/N_0 에서 10^{-2} 이하의 BER을 모든 RCPC 코더에서 얻었고, 14dB의 E_b/N_0 에서 10^{-3} 이하의 BER을 얻었다. 두 경우에서 RCPC 코더의 BER로 본 성능은 1/2 Rate(case 1) 코더와 비교하여 볼 때 큰 차이가 없거나 조금 높은 BER을 나타냄을 알 수 있다.

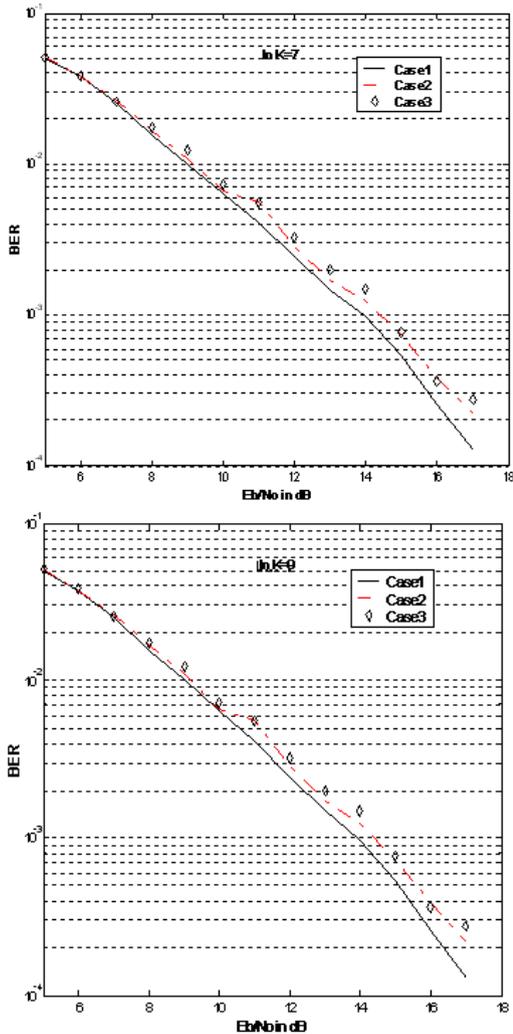


그림 8. Rayleigh fading 환경에서의 BER

표 4. MOS 테스트 측정값

Error Free Channel		3.022	
Case		K=9	K=7
AWGN 1dB	Case1	2.180	2.096
	Case2	2.516	2.424
	Case3	2.682	2.40
Fading 7dB	Case1	2.111	2.118
	Case2	2.469	2.228
	Case3	2.491	2.266
Fading 11dB	Case1	2.696	2.527
	Case2	2.949	2.897
	Case3	2.957	2.806

전체적인 소스 코더, 채널 코더의 성능 평가는 AWGN 환경과 페이딩 채널에서 채널 코더를 통과한 데이터를 EHSX 코더로 복호화한 음성데이터의 MOS 값을 측정하였다. MOS 시험 결과는 [표 4]에 나타나 있다.

[표 4]에서 나타나듯이 모든 경우에는 1/2 Rate 코더(case 1) 보다 RCPC 코더(case 2)의 음질이 더 좋게 평가됨을 알 수 있다. AWGN 환경에서는 1/2 Rate 코더 보다 RCPC 코더가 E_b/N_0 이 1dB 일 때 MOS 0.21 정도가 높게 나왔으며, E_b/N_0 이 2dB 일 때 MOS 0.11 정도가 높게 나왔다. 페이딩 채널에서는 case 1인 경우보다 case 2인 경우가 E_b/N_0 이 6dB 일 때 MOS 0.36 정도가 높게 나왔으며, E_b/N_0 이 10dB 일 때 MOS 0.3 정도가 높게 나왔다. 대체적으로 E_b/N_0 의 값이 작을수록 MOS 값의 차이가 커짐을 알 수 있었고, RCPC 코더가 1/2 Rate 코더보다 BER은 높았지만 MOS 값이 향상됨을 확인하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 기존의 2.4kbps EHSX 음성 코더와 결합된 채널 코딩 방법인 RCPC 코더의 성능을 향상시키기 위하여 소스 부호화된 비트들의 중요도에 따른 효과적인 채널코더의 부호화 방법에 대하여 제안하였다. 소스 코더는 EHSX 코더를 사용하였고, 채널 코더로는

RCPC 코더와 Viterbi 디코더를 사용하였다. 채널 코더의 부호율은 기존의 1/2로 단순히 고정된 것이 아닌, 소스 부호화된 비트들의 중요도를 고려하여 1/2로 맞추었고, 소스 부호화된 비트들의 중요도는 각 비트들의 채널 에러에 대한 감응도를 측정하여 결정하였으며, 최종적으로 AWGN 환경과 페이딩 채널 환경에서 성능 평가 시뮬레이션을 하였다.

그 결과 본 논문에서 제안된 RCPC 코더는 부호율이 1/2인 Convolutional 코더와 비교했을 때 BER에서는 큰 차이가 없거나 조금 높았지만, MOS 0.25~0.35 정도의 음질 향상을 확인하였고, 이것은 채널 에러에 대해 중요한 비트를 더 잘 보호하기 때문이다.

이와 같이 소스 코더에서의 출력 데이터를 채널 코딩 하는데 있어서, 기존의 부호율이 고정된 채널 코딩 방법보다는 소스 코더 출력 데이터의 감응도에 따라 차등적으로 부호율을 조절하는 채널 코딩 방법이 더 나은 성능을 보여주었다.

참고 문헌

- [1] P. Hoeber, J. Hangenauer, E. Offer, Ch. Rapp, and H. Schulz, "Performance of RCPC-coded OFDM-based digital audio broadcasting(DAB) system," in Proc. IEEE GLOBECOM'91 Conf., Vol.1, pp.2.1.1-2.1.7, 1991(12).
- [2] M. J. Ruf and P. Filip, "Combining source and channel coding transmission of PVQ compressed images over Gaussian and Rayleigh fading channels," in Proc. PCS'93, Lausanne, Switzerland, 1993(3).
- [3] M. G. Kim, "On Systematic Punctured Convolutional Codes," IEEE Trans. on Communications, Vol.45, No.2, pp.133-139, 1997(2).
- [4] Kamil Feher, Wireless Digital Communications Modulation & Spread Spectrum Applications, Prentice Hall, 1995.

- [5] J. Hagenauer, "Rate-Compatible Punctured Convolutional Codes(RCPC Codes) and their Application," IEEE Trans. on Communications, Vol.36, No.4, pp.389-400, 1988(4).
- [6] Peter Sweeney, Error Control Coding an Introduction, Prentice Hall, 1991.

저자 소개

이창환(Chang-Hwan Lee)

정회원



- 2003년 2월 : 충북대학교 전기전자공학부(공학사)
- 2005년 2월 : 충북대학교 전파공학과(공학석사)
- 2005년 : LG전자 CTO 이동통신기술연구소

- 2009년 : LG전자 MC 연구소 4G 개발실
- 2010년 : LG전자 MC 연구소 SP 개발실
- <관심분야> : 음성 신호처리, 이동통신

김영준(Young-Joon Kim)

정회원



- 2004년 2월 : 충북대학교 전기전자공학부(공학사)
- 2008년 2월 : 충북대학교 전파공학과(공학석사)
- 2008년 3월 : 충북BIT연구중심 대학육성사업단 전임연구원

- 2009년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전파통신공학과 박사과정 재학
- <관심분야> : 영상 신호처리, 이동통신, USN

이 인 성(In-Sung Lee)

정회원



- 1983년 2월 : 연세대학교 전자공학
학과(공학사)
- 1985년 2월 : 연세대학교 전자공
학과(공학석사)
- 1986년 5월 ~ 1987년 7월 : 한국
통신 연구개발단 전임 연구원
- 1992년 12월 : Texas A&M University 전기공학과
(공학박사)
- 1993년 2월 ~ 1995년 9월 : 한국전자통신연구원 이
동 통신기술연구단 선임 연구원
- 1995년 ~ 현재 : 충북대학교 전자정보대학 교수
<관심분야> : 음성 및 영상 신호압축, OCDMA, 적응
필터, 이동통신