

거리 분포 특성에 근거한 터보 부호의 순환 조직형 컨벌루션 부호 설계

준회원 김대선*, 종신회원 송홍엽*, 준회원 이동학**, 정회원 유재황**

Design of Recursive Systematic Convolutional Codes for Turbo Codes Based on the Distance Spectrum Properties

Dae-Son Kim* *Associate Member*, Hong-Yeop Song* *Lifelong Member*,
Dong-Hahk Lee** *Associate Member*, Jaehwang Yu** *Regular Member*

요 약

본 논문에서 터보 부호의 성능을 최대화 시킬 수 있도록 구성 부호의 거리 분포 특성에 근거하여 구성 순환 조직형 컨벌루션(RSC : recursive systematic convolutional) 부호를 설계 하는 방법을 제안한다. 부호율이 1/2인 RSC 부호에 대하여 컴퓨터로 검색하고 그 결과는 표로 정리하여 제시한다. 찾은 부호들의 성능은 컴퓨터 모의실험을 통해 검증한다. 제안된 방법으로 설계한 부호들은 반복 복호에 따른 빠른 수렴 정도를 보여주면서 좋은 성능을 가진다.

Key Words : Turbo codes, Effective free distance, Concatenated codes

ABSTRACT

In this letter, we propose a new design of recursive systematic convolutional (RSC) codes based on the distance spectrum properties which can maximize the performance. Good constituent RSC codes of code rate 1/2 are searched by computer and presented in a table. Their performances are shown by computer simulation. New designed codes shows faster convergences according to iterative decoding and good performances.

I. 서 론

터보 부호화기는 두 개의 RSC 부호가 인터리버를 사이에 두고 병렬로 연결되어 있으며 복호화기는 두 개의 복호기가 직렬로 연결되어 두 개의 복호기 사이에 정보를 주고받으면서 확률적 반복 복호화 알고리즘을 이용하며 채널 용량의 한계(Shannon limit)에 근접한 성능을 발휘한다. 터보 부호의 부호화기 구조에서 조직(systematic) 형태는

병렬 연결 시 전체 부호율을 높여 주어 주파수 효율을 좋게 해주고 복호기에서의 복호화 복잡도 또한 낮추어 준다. 터보 부호의 순환(recursive) 형태는 인터리버의 성능을 극대화 하여 터보 부호의 성능을 높이는 중요한 요소이다^{[1], [2]}. Benedetto 등은 터보 부호 중 구성 컨벌루션 부호의 설계에 있어서 가장 중요한 요소가 effective free distance라는 것을 증명하였으며, 부호율이 1/2인 부호들을 제시하였다^[3]. Divsalar 등은 역시 effective free

※ 본 연구는 SK텔레콤의 "4세대 무선 이동 네트워크 구성을 위한 핵심 기술 개발" 과제의 지원에 의해 이루어졌음

* 연세대학교 전기전자공학과 부호 및 정보이론 연구실(ds.kim, hy.song}@coding.yonsei.ac.kr)

** SK텔레콤 Access망개발팀

논문번호 : KICS2007-07-305, 접수일자 : 2007년 7월 10일

distance를 근간으로 여러 부호율에 대하여 확장하여 찾은 부호들을 제시하였다⁴⁾. Benedetto 등은 논문 [5]에서 좀 더 다양한 조건을 고려하여 설계하는 방법을 제안하였다. 즉, i 가 2부터 6까지 순차적으로 먼저 최대 d_i 를 가지도록 하고 그다음 최소 N_i 를 가지도록 (d_i, N_i) 를 최적화 시켜 부호를 찾는 방법을 제안하였다. 여기서 d_i 는 입력 부호열의 무게가 i 일 때 해당 부호화기의 출력 부호열들의 무게 값 중 가장 작은 값이며, N_i 는 무게 d_i 를 가지는 서로 다른 부호열들의 개수이다. d_i 중 가장 작은 값을 free distance, d_f , 라고 하며 입력 무게가 2일 때 즉 d_2 가 effective free distance, $d_{f,eff}$, 가 된다. Benedetto 등은 본 방법에 의해 여러 부호율에 대하여 부호들을 제시하였으며, 제시된 부호들이 좋은 성능을 가지고 있다고 잘 알려져 있다.

그 외에도 터보 부호를 위한 컨벌루션 부호의 다양한 설계 방법들이 제안되어왔다. 큰 메모리 크기를 가지고 있는 구성 부호들로 이루어진 터보 부호의 경우 복호과정에서 그 복호기들이 나쁜 잉여 a posteriori probability (APP) 값을 산출함으로 인해 낮은 신호 대 잡음비에서 성능 열화가 발생한다. 이를 위하여 논문 [6]에서는 Big Numerator-Little Denominator (BN-LD) 부호를 제안하였다. 또한 Jiang등은 BN-LD 부호를 이용한 시변(time-varying) 터보 부호를 제안하였다⁷⁾. 시변 컨벌루션 부호화기는 부호어를 발생하는 발생 다항식 $G(D)$ 가 매 시간마다 다른 형태로 바뀌게 된다. 시간 i 일 때 시변 부호화기의 발생 다항식을 $G_i(D)$ 라고 하자. 만약 모든 시간 i 에 대하여 $G_i(D) = G_{i+T}(D)$ 를 만족한다면 주기 T 를 가진 주기 시변 부호화기라 한다. $T=1$ 이면 시불변 부호화기가 된다. 논문 [7]에서는 제안한 부호는 $G_1(D)$ 를 메모리 크기가 6인 BN-LD 부호로 사용하고 $G_2(D)$ 를 maximal free distance (MFD)를 가진 컨벌루션 부호를 사용한 주기가 2인 주기시변 터보 부호이다. Jiang등은 BN-LD 부호의 낮은 신호 대 잡음비에서의 수렴 특성과 MFD 부호의 큰 free distance 특성을 결합하고자 하였다. Yuan 등은 낮은 신호 대 잡음비에서 비트 오류율을 최소화 되도록 설계하는 방법을 제안하였는데 optimal distance spectrum (ODS) 터보 부호라고 하였다⁸⁾. ODS 터보 부호는 주어진 인터리버의 크기, 메모리 크기, 그리고 부호율에 대하여 가장 좋은 거리 분포 특성을 가지는 구성 RSC 부호로 이루어져 있다.

표 1. 설계 방법에 따른 구성 RSC 부호화기 및 거리 분포 특성

	부호	m	T	d_2	N_2^T	d_f	N_f^T
Berrou ^[1]	(21, 37)	4	1	7	1	6	1
Benedetto ^[3]	(23, 37)	4	1	12	1	6	1
TV ^[7]	$\begin{pmatrix} 7, 143 \\ 117, 155 \end{pmatrix}$	6	2	6	1/2	6	1/2
ODS ^[8]	(37, 21)	4	1	6	1	6	1

본 논문의 II장에서는 기존에 제안된 터보 부호를 위한 구성 컨벌루션 부호의 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통해 알아보고 그 차이점들을 비교해 보고자 한다. 또한 터보 부호의 좋은 구성 RSC 부호를 설계하기 위한 중요한 요소들에 대하여 자세히 고찰하고자 한다. III장에서는 새로운 설계 방법을 제안하고 부호율 1/2인 좋은 구성 RSC 부호를 제시한 후 컴퓨터 모의실험을 통해 그 부호들의 성능을 검증하고자 한다. 마지막으로 IV장에서는 간단한 결론으로 본 논문을 마칠 것이다.

II. Effective free distance와 free distance

본 장에서는 effective free distance와 free distance가 터보 부호에 성능에 어떤 영향을 주는지 살펴보고자 한다.

이전 장에서 제안한 설계 방법에 따른 부호들과 그 부호들의 차이점을 고려해보자. 표 1에서는 Berrou가 처음 제안한 부호^[1]을 포함하여 설계 방법에 따른 부호들의 발생 다항식과 특성들이 나열되어 있다. 각 부호들의 발생 다항식은 $(g_1(D), g_2(D))$ 형태로 되어 있는데 $g_1(D)$ 는 귀환 연결 다항식(feedback connection polynomial)이고 $g_2(D)$ 는 출력 연결 다항식(feedforward connection polynomial)이며, 각 연결 다항식은 오른쪽 비트에 최소항이 오도록 8진수 형태로 되어 있다. m 은 각 부호의 메모리 크기를 나타낸다. 부호들의 비트 오류율과 프레임 오류율이 그림 1에 나와 있다. 확산 요소가 20이고 길이가 1000인 서로 다른 10개의 s-random 인터리버를 사용하여 각 부호들에 대하여 평균 성능을 구하였다. 복호 방법은 log-MAP을 사용하였으며 최대 반복 복호 회수를 8로 하였다. 복호 도중 복호된 부호어에 오류가 없을 경우 복호를 멈추는 Genie

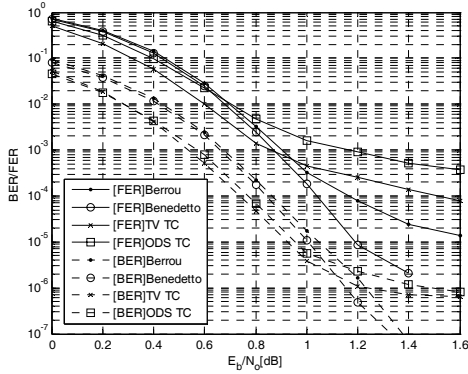


그림 1. AWGN 채널에서 인터리버의 길이가 1000이고 전체 부호율이 1/3일때 설계 방법에 따른 표 1의 부호들에 성능 비교

멈춤 규칙을 사용하였다. 터보 부호의 전체 부호율은 1/3이며 AWGN 채널에서 BPSK 변복조 방식을 사용하였다. 전체 부호의 메모리 크기는 시변 터보 부호를 제외하고 4이며 시변 터보 부호는 6이다. ODS 터보 부호와 시변 터보 부호가 낮은 신호 대 잡음비에서 좋은 성능을 보여주고 있지만 높은 신호 대 잡음비에서는 오류 마루 현상이 빨리 일어나는 것을 확인 할 수 있다. 더욱이 두 부호의 FER 성능은 낮은 신호 대 잡음비에서도 다른 부호들에 비해 크게 좋지 않음을 알 수 있다. Benedetto가 제안한 부호가 높은 신호 대 잡음비에서 가장 좋은 성능을 보여주고 있다. 각 부호들은 같은 d_f 를 가지고 있지만 $d_{f,eff}$ 는 다른 값을 가지고 있다. $d_{f,eff}$ 가 커지면 커질수록 높은 신호 대 잡음비에서 더 좋은 성능을 보여 줌을 알 수 있다.

터보 부호와 effective free distance의 관계는 확장 정합 그래프(extended matching graph)를 이용하여 설명 할 수 있다. 구성 컨벌루션 부호의 메모리 크기가 2인 병렬 연결 터보 부호의 확장 정합 그래프가 그림 2에 나와 있다. 그래프는 노드(v)들과 노드들에 의해 연결된 연결선들로 구성되어 있다. 모두 0인 부호열을 전송하였다 가정했을 경우, 두 노드들 즉 $v_{0,i}$ 와 $v_{0,j}$ 를 연결하는 연결선들은 첫 번째 부호화기의 $d_{f,eff}$ 에 대응하는 오류 사건이고, $v_{1,i}$ 와 $v_{1,j}$ 를 연결하는 연결선들은 두 번째 부호화기의 $d_{f,eff}$ 에 대응하는 오류 사건이다. 두 노드들, $v_{0,i}$ 과 $v_{1,j}$ 를 연결하는 연결선들은 길이가 L 인 인터리버에 의해 결정되어 진다 ($0 \leq i, j \leq L-1$). 그림 2는 각각 입력 무개 2인 경우와 4인 경우 일어날 수 있는 짧은 사이클들 중 두 가지 경우를 보여주고

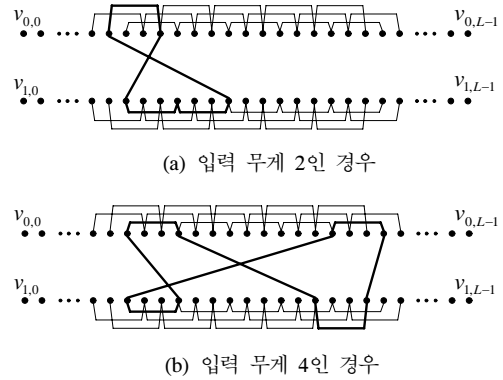


그림 2. 짧은 사이클을 이루는 두 가지 경우에 대한 확장 정합 그래프 (extended matching graph)

있다. 이러한 종류의 짧은 사이클들은 낮은 무개를 가지는 부호어에 대응하며 수신한 부호어들을 잘못 복호하여 프레임 오류를 발생시키고 전체 성능을 열화 시키게 된다. 특히 높은 신호 대 잡음비에서 좋은 부호를 설계하기 위해서는 큰 $d_{f,eff}$ 를 가지도록 설계해야 하며, 만약 부호율이 1/2인 RSC 부호 설계 시 원시 다항식(primitive polynomial)을 귀환 연결 다항식으로 사용한다면 최대 $d_{f,eff}$ 를 얻을 수 있다. 하지만 메모리의 크기가 큰 경우 최대 $d_{f,eff}$ 값은 충분히 크다. 예를 들어 메모리 크기가 5인 경우 최대 $d_{f,eff}$ 는 20이며 6인 경우 최대 $d_{f,eff}$ 는 32가 되어 잘 설계된 인터리버를 사용 시 성능에 거의 영향을 주지 않게 된다. 그와 반대로 메모리 크기가 크고 최대 $d_{f,eff}$ 를 가진 부호들의 경우 복호기에서 반복 복호 시 각 정보 비트들에 대하여 나쁜 잉여 APP 추정 값을 산출함으로 성능이 오히려 열화 되는 결과를 가져온다. 본 논문에서는 부호에 성능을 높여주면서 어느 정도의 $d_{f,eff}$ 값을 유지하는 설계 방법을 제안하고자 한다.

터보 부호의 설계에 있어서 구성 RSC 부호의 free distance는 중요한 요소로 고려되어 오지 않고 있다. 터보 부호의 성능과 free distance와의 관계를 고찰하여보자. 표 2는 메모리 크기가 4이고 부호율이 1/2인

표 2. 메모리 크기가 4인 두 개의 RSC 부호들과 그 거리 분포 특성

	부호	d_2	N_2^T	d_3	N_3^T	d_f	N_f^T
Code1 (B4-4)	(23,37)	12	1	8	3	6	1
Code2 (N4-4)	(23,35)	12	1	7	1	7	2

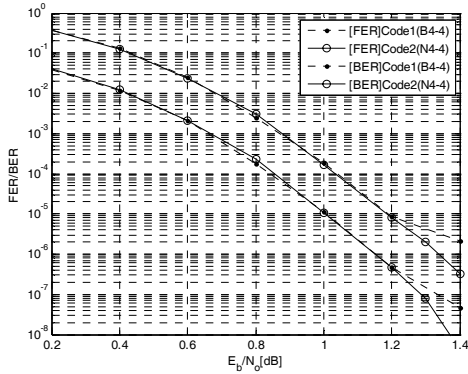


그림 3. AWGN 채널에서 인터리버의 길이가 1000이고 전체 부호율이 1/3일때 설계 방법에 따른 표 1의 부호들에 성능 비교

구성 RSC 부호의 두 경우가 나와 있다. Code1은 논문 [5]에서 참조 한 것이다. 두 부호 모두 $d_{f,eff}$ 가 12로 같은 값을 가지고 있다. Code2의 d_3 는 7로 Code1의 것보다 작지만 d_7 는 7로 Code1의 것보다 큰 값을 가지고 있다. 그들의 BER과 FER 성능이 그림 3에 나와 있다. 인터리버와 모의실험 환경은 그림 1과 동일하다. 두 부호 모두 거의 같은 성능을 보여 주고 있지만 높은 신호 대 잡음비에서 Code2의 성능이 더 좋아지는 것을 확인 할 수 있다. Free distance 또한 높은 신호 대 잡음비에서 좋은 성능을 얻기 위한 중요한 요소임을 알 수 있다.

III. 좋은 부호를 위한 구성 부호 설계

Effective free distance, free distance, 그리고 거리 분포 특성 등은 병렬 연결 터보 부호의 구성 RSC 부호 설계에 있어서 중요한 요소를 하고 있다. 이러한 요소들에 근거하여 부호율이 1/2이고 좋은 구성 RSC 부호들을 컴퓨터를 이용하여 찾아보았다.

표 3. 설계 방법에 따른 구성 RSC 부호화기의 기술 및 거리 분포 특성

	부호	m	v_{g1}	d_2	N_2^T	d_f	N_f^T
Code(B4-4)	(23, 37)	4	4	12	1	6	1
Code(B5-5)	(67, 45)	5	5	20	1	8	3
Code(B6-6)	(147, 115)	6	6	36	1	9	2
Code(N4-4)	(23, 35)	4	4	12	1	7	2
Code(N5-4)	(23, 55)	5	4	12	1	7	2
Code(N6-3)	(13, 157)	6	3	12	1	7	1
Code(N6-4)	(23, 107)	6	4	12	1	6	1

검색 알고리즘은 다음 순서와 같다.

- 메모리 크기 m 을 선택하고 귀환 연결 다항식의 차수 v_{g1} 을 메모리 크기 m 과 같거나 작게 선택한다. 출력 연결 다항식의 차수는 항상 m 으로 한다.
- 귀환 연결 다항식 $g_1(D)$ 의 경우 차수 v_{g1} 을 가지는 원시 다항식 중에 선택한다.
- 출력 연결 다항식 $g_2(D)$ 는 차수 m 이고 $g_1(D)$ 와 서로 소인 다항식 중에 선택한다.
- 본 알고리즘은 먼저 실험적으로 찾은 최적의 effective free distance와 free distance를 가지는 부호를 찾고 그 다음 좋은 거리 분포를 가지는 RSC 부호를 찾는다.

본 알고리즘에 의해 찾아진 부호들은 II장에서와 같은 s-random 인터리버와 실험 환경에서 FER 10^{-6} 범위까지 컴퓨터 모의실험을 통해 검증하였다. 메모리 크기가 4 보다 작을 경우 $d_{f,eff}$ 값은 최댓값을 가지는 경우가 최적 이었으며, 메모리 크기가 4와 같거나 큰 경우는 12를 가지는 경우가 가장 좋은 성능을 보였다. 물론 같은 설계 조건에서 12보다 더 큰 $d_{f,eff}$ 를 가지는 부호들도 존재하였지만 12의 경우보다 더 좋지 않았다. 본 알고리즘에 의해 찾은 부호들과 성능 비교를 위한 Benedetto가 제안한 부호들의 연결 다항식과 간단한 특징들이 표 3에 나열되어 있다. Code(Ni-j)는 메모리 크기가 i 이고 귀환 연결 다항식의 차수 v_{g1} 가 j 이며 본 논문에서 제시한 방법으로 찾은 새로운 부호들을 나타내고 있으며, Code(Bi-j)는 Benedetto가 제시한 부호^[5]들을 나타낸다. 그림 4는 메모리 크기가 4인 경우

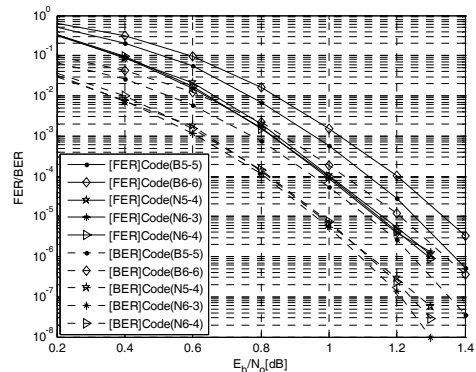
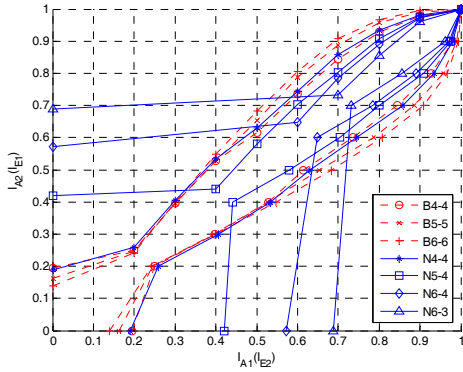
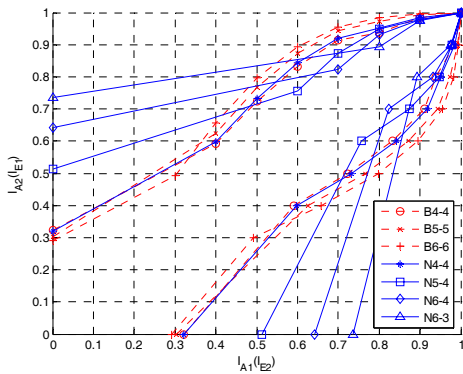


그림 4. AWGN 채널에서 인터리버의 길이가 1000이고 전체 부호율이 1/3일때 설계 방법에 따른 표 1의 부호들에 성능 비교



(a) $E_b/N_0 = 0.6\text{dB}$ 에서의 EXIT chart



(b) $E_b/N_0 = 1.2\text{dB}$ 에서의 EXIT chart

그림 5. 표 3의 부호들의 그림 3, 4 환경에서 E_b/N_0 가 0.6dB 일때와 1.2 dB 일때의 EXIT chart

를 제외하고 표 3에 나와 있는 다양한 부호들에 대하여 신호 대 잡음비에 대하여 이전과 같은 실험 환경에서의 BER과 FER 곡선이다. 메모리 크기 4인 경우는 이미 그림 3에서 보여 주었다. 그림 5는 표 3의 그림 3, 4에 대한 EXIT chart를 보여주고 있다^{[10][11]}. 그림 5의 (a)와 (b)는 각각 신호 대 잡음비 E_b/N_0 가 0.6dB일 경우와 1.2dB의 경우의 EXIT chart이다. 채널 환경을 변화 시켜가면서 평균 상호 정보 (mutual information) 값을 구하였다. Benedetto가 제안한 부호들은 메모리 크기가 증가함에 따라 병목 지역(bottleneck region)까지의 폭이 점점 줄어들고 있으며 wide-open 지역에서는 약간 넓어지고 있다. 즉 반복 복호에 따른 정보의 수렴이 늦거나 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 새로 제안한 부호들의 경우 메모리의 크기가 증가함에 따라 pinch-off 지역이 점점 더 넓어지며 귀환 다항식의 차수가 줄어들며 따라 더 넓어지는 것을 알

수 있다. 즉 반복 복호에 따른 정보의 수렴이 커진다는 것을 알 수 있다. 그림 4에서도 Benedetto의 부호들은 메모리 크기가 점점 증가함에 따라 성능이 더 열화 되는 모습을 보여 주고 있지만 새로운 부호들은 조금씩 좋아짐을 확인 할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서 실험적으로 찾은 effective free distance값에 근거하여 부호율이 1/2인 구성 RSC 부호들을 설계 하는 방법에 대하여 고찰하였다. 컴퓨터를 이용하여 새로운 부호들을 찾아 포로 나열하였다. 새로운 부호들은 FER 10^{-6} 범위까지 최적화 되었으며 $d_{f,eff}$ 는 12값으로 하였다. 이론적으로 최적의 $d_{f,eff}$ 값이 어떤 값을 가지는지에 대한 것은 앞으로 연구할 주제이다. Effective free distance값을 크게 할 경우 전체 터보 보호의 free distance는 크게 할 수 있지만 코드 전체의 성능을 항상 향상시키는 것은 아니며 본 논문에서 제안한 설계 방법을 이용할 경우 반복 복호에 따른 수렴 속도가 높여 주면서도 오류 마루 현상을 어느 정도 억제 할 수 있는 부호를 설계 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: turbo-codes," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.44, Issue 10, pp.1261-1271, Oct. 1996.
- [2] S. Benedetto, G. Montorsi, "Unveiling Turbo Codes : Some Results on Parallel Concatenated Coding Schemes," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 42, No.2, pp.409-428, Mar. 1996
- [3] S. Benedetto, G. Montorsi, "Design of parallel concatenated convolutional codes," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.44, Issue 5, pp. 591-600, May 1996.
- [4] D. Divsalar and R. J. McEliece, R.J, "Effective free distance of turbo codes," *Electronics Letters*, Vol.32, Issue 5, pp.445-446, 1996.
- [5] S. Benedetto, R. Garello and G. Montorsi, "A search for good convolutional codes to be used in the construction of turbo codes," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.46, Issue 9, pp.1101-1105, Sept. 1998.

[6] P.C. Massey, O. Y. Takeshita, and D. J. Costello Jr, "Contradicting a myth: good turbo codes with large memory order," in *Proceedings IEEE International Symposium on Information Theory.*, pp.122, 25-30 June 2000

[7] Fan Jiang, M.R. Becker, and L. C. Perez, "Time-varying turbo codes," *IEEE Commun. Letters*, Vol.8, Issue 8, Aug. 2004, pp.529 - 531

[8] J. Yuan, B. Vucetic, and W. Feng, "Combined turbo codes and interleaver design," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.47, Issue 4, pp.484-487, April 1999

[9] A. Perotti and S. Benedetto, "A new upper bound on the minimum distance of turbo codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.50, Issue 12, pp.2985-2997, Dec. 2004

[10] S. ten Brink, "Convergence Behavior of Iteratively Decoded Parallel Concatenated Codes," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 49, No. 10, pp.1727-1737, Oct. 2001

[11] J. W. Lee and R. E. Blahut, "Generalized EXIT Chart and BER Analysis of Finite-length Turbo Codes," *IEEE Globecom 03*, Vol.4, pp.2067-2072, Dec. 2003

김 대 선 (Dae-Son Kim)

준회원



2001년 2월 건국대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 2003년 2월 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업 (공학석사)
 2006년~현재 연세대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정
 <관심분야> Error Correcting Codes, Turbo code, LDPC, MC-CDMA, Spread Spectrum Communication Systems

송 흥 엽 (Hong-Yeop Song)

중신회원



1984년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1986년 5월 USC 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사)
 1991년 12월 USC 대학원 전자공학과 졸업 (공학박사)
 1992년~1993년 Post Doc., USC

전자공학과

1994년~1995년 8월 Qualcomm Inc., 선임연구원
 2002년 3월~2003년 2월 University of Waterloo, Canada, 방문연구교수
 1995년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수
 <관심분야> PN Sequences, Error Correcting Codes, Spread Spectrum Communication Systems, Steam Cipher Systems

이 동 학 (Dong-Hahk Lee)

준회원



1988년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1991년 2월 포항공대 전자공학과 졸업 (공학석사)
 1996년 2월 포항공대 전자공학과 졸업 (공학박사)
 1996년~현재 SK 텔레콤 네트워크

선임 연구원

<관심분야> W-CDMA 모델설계,, OFDM, 4G, 통신/방송 융합기술

유 재 황 (Jaehwang Yu)

정회원



1984년 2월 경북대학교 전자공학과 학사
 1986년 2월 연세대학교 전자공학과 석사
 2005년 8월 KAIST 전기및전자공학과 박사
 1988년 4월~1993년 11월 국제상

사 전자기술연구소 선임연구원

1993년 11월~2006년 1월 SK 텔레콤 Network연구원 엔지니어링기술개발팀장, Network기술기획팀장
 2006년 1월~현재 SK 텔레콤 Access기술연구원 Access망개발3팀장
 2006년 1월~현재 BcN Forum 무선방송분과장
 <관심분야> 4G, USN, 통신/방송 융합기술, SDR