

# 터보 TCM 디코더의 복호 지연을 감소시키기 위한 효율적인 반복복호 제어기법

## Effective Iterative Control Method to Reduce the Decoding Delay for Turbo TCM Decoder

김순영 · 김정수\* · 장진수\*\* · 이문호\*\*\*

Soon-Young Kim · Jeong-Su Kim\* · Jin-Su Chang\*\* · Moon-Ho Lee\*\*\*

### 요 약

본 논문에서는 전력이 제한된 환경에서 사용이 고려되고 있는 터보 TCM(Turbo Trellis Coded Modulation)에 대하여 낮은 복잡도를 갖는 효율적인 반복복호 제어기법을 제안한다.

터보 부호의 복호 과정에서 반복 복호수를 증가하면 성능이 향상되지만 어느 정도의 반복 복호수 이상에서는 성능 향상이 거의 나타나지 않는다. 따라서 복호 계산량과 복호지연을 감소시킬 수 있도록 반복 복호과정을 효율적으로 정지시킬 수 있는 반복복호 제어가 필요하다. 본 논문은 복호지연 및 반복복호 횟수를 줄일 수 있는 효율적인 알고리즘을 제시한다. 제안 기법은 터보 TCM 복호화 과정에서 궤환되는 외부부가정보의 특성에 따른 임계치를 이용하여 반복 복호수를 가변적으로 제어하는 기법이다. 성능 분석 결과 제안구조는 복호과정의 계산량과 지연을 성능 저하 없이 효율적으로 감소시킬 수 있음을 보여준다.

### Abstract

In this paper, we propose an efficient iteration control method with low complexity for Turbo TCM(Turbo Trellis Coded Modulation) decoding which will be used for power-limited environment.

As the decoding approaches the performance limit of a given turbo code, any further iteration results in very little improvement. Therefore, it is important to devise an efficient criterion to stop the iteration process and prevent unnecessary computations and decoding delay. This paper presents an efficient algorithm for turbo TCM decoding that can greatly reduce the delay and iteration number. The proposed method use adaptive iteration number according to the criterion using the extrinsic information variance parameter in turbo TCM decoding process. The simulation results show that the proposed technique effectively can reduce the decoding delay and computation with very little performance degradation.

Key words : Turbo Codes, TCM, Iterative Decoding, Stopping Criteria

### I. 서 론

현재 터보 TCM(Turbo Trellis Coded Modulation)

은 주로 위성통신 등 전력이 제한된 환경에서 연구되고 있으며, 대역폭 효율이 필요한 환경에서 그 이용도가 검토되고 있다. 특히, INMARSAT 및 INTE-

한국통신(KT:Korea Telecom)

\*한국사이버대학교(Korea Cyber University)

\*\*전주공업대학(Jeonju Technical College)

\*\*\*전북대학교(Chonbuk National University)

· 논문 번호 : 20030212-027

· 수정완료일자 : 2003년 6월 16일

LSAT에서는 터보 코드와 16-QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 변조기술 결합에 바탕을 둔 64 kbits/s의 전송률을 갖는 터보 TCM 기술이 새로운 이동 멀티미디어 서비스 기술로서 사용이 고려되고 있으며, INTELSAT에서는 디지털 서비스의 응용에 관한 연구를 진행하고 있다.

터보 TCM은 채널 에러측면에서 부호화한 출력과 입력을 인터리빙 하여 변형된 출력을 동시에 전송함으로써 이중의 부가 정보를 주어 Shannon의 성능한계에 근접하는 우수한 성능을 나타내는 터보부호(Turbo Codes)와 대역폭 효율을 증대시키기 위한 교차 변조기술(8-PSK, 16-QAM 등)을 적용한 방식이다<sup>[1],[2]</sup>.

터보부호의 복호화 과정에서와 마찬가지로 반복복호기법을 사용하는 터보 TCM의 복호화 과정에서도 반복복호 횟수를 증가하면 성능이 향상되지만 반복복호수가 증가할수록 복호를 위한 전력과 지연이 증가하게 된다는 단점을 가지게 된다. 또한 복호화 과정에서도 어느 정도의 반복복호수 이상에서는 성능 향상이 거의 나타나지 않게 된다<sup>[3],[4]</sup>. 따라서 높은 BER(Bit Error Rate) 성능을 유지하면서 반복복호수의 효율적인 제어가 되는 기법이 필요하게 된다. 터보부호에서는 이런 반복복호를 효율적으로 제어하기 위한 반복복호 정지기준들이 발표되었다<sup>[6],[7]</sup>.

터보 부호를 위한 반복복호 정지기준 가운데 교차 엔트로피를 사용한 반복복호 정지기준은 Hagenauer가 제안하였으며, 이 방법은 복잡한 계산을 포함하고 있어 구현상의 어려움이 있게 된다. 이를 해결하는 구조로 R. Y. Shao가 제안한 두 가지 정지기준 구조가 있다. 첫째는 복호화 과정에서 부호 변화율(sign change ratio, SCR)을 기준으로 하는 정지기준이 있고, 둘째는 부호가 정보 블록의 모든 비트에 대해 같으면 복호를 중지하는 기준으로 하는데 이를 경성 결정(hard decision aided, HDA) 정지기준이라 한다. 이 구조를 비교해 보면 같은 평균 반복복호수에서 교차 엔트로피 방식이  $(5N-1)$  실수 연산과  $(N+2)$ 의 실수 메모리가 필요하지만 SCR 방식은  $(3N-1)$  정수 연산과  $(N+2)$ 의 정수 메모리만 필요하므로 계산량 및 하드웨어 복잡도가 감소하게 된다는 장점을 가진다. 또한 HDA 구조는 같은 비트

오율에서 낮은 SNR(Signal to noise ratio)에서 중간 정도의 SNR까지는 평균반복복호수가 감소하는 장점이 있으나 높은 SNR에서는 교차 엔트로피 방식이나 SCR 방식보다 비효율적이다. 그 외에 터보 복호과정에서 CRC(cyclic redundancy check) 에러 검출을 이용하여 반복복호를 정지시키는 방법이 있다. 이 방법은 복호화 과정 중에서 프레임 에러가 발견되지 않는다면 그 이후의 반복복호는 필요하지 않다는 원리로서, 터보 부호화 이전에 CRC 코딩을 하고, 각 반복복호 단계에서 CRC 디코딩을 수행함으로써 에러 유무가 수신측에서 발견되어질 수 있다는 것을 이용하여 반복복호의 정지기준을 정하는 것이다.

본 논문에서는 최근에 다각도로 연구되고 있는 터보부호 TCM 복호기에서 반복복호수를 적응적으로 설정하고자, 반복복호시에 터보 TCM 복호기에서 출력되는 정보의 delta variance 특성을 이용하는 방법으로 비교적 반복복호 제어가 간단하게 이루어지는 기법을 제안하고 컴퓨터를 이용한 성능 분석을 한다.

## II. 적응적 반복복호 제어기법

터보 TCM 복호기에서 가변적으로 반복복호수를 설정하기 위해서는 성능 감소가 거의 없는 최적의 반복복호수를 설정하는 것이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 MAP(Maximum a posteriori) 복호기의 LLR(Log Likelihood Ratio) 값에서 외부정보의 분산을 측정하고, 이를 이용하여 최적의 반복복호수를 설정한다.

그림 1은 P. Robertson이 제안한 터보 TCM의 복호기 구조를 보여준다<sup>[5]</sup>. 터보 TCM의 복호기 구조는 S-b-S(Symbol by Symbol) MAP 복호기 두 개와 그 사이에 인터리버 및 부가정보의 캐환동작을 시키기 위하여 필요한 디인터리버로 구성되어 있다. 하나의 S-b-S MAP 복호기로부터 다른 S-b-S MAP 복호기를 통과하는 정보의 특성 차이를 제외하고는 이전 터보부호와 유사하다. 디코더에서 "\*"는 평처리된 심벌을 의미한다. 중요한 특징은 잡음이 parity 성분뿐만 아니라 systematic 성분에 영향을 주기 때문에 systematic 정보와 extrinsic 정보는 분리될 수

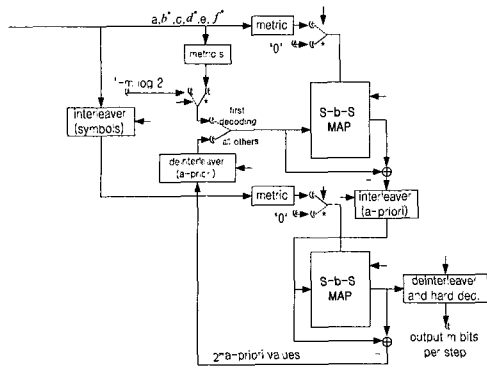


그림 1. Turbo TCM 복호기 구조  
Fig. 1. Decoder structure of Turbo TCM.

없다. 즉, 이진 터보코드와 달리, systematic 정보는 심벌단위로 parity 정보와 함께 전송된다. 그러므로, MAP 디코더의 출력은 단순히 세 가지 형태로 분리될 수 없고 다음과 같이 두 가지 형태로 분리된다. 하나는 a priori 정보와 다른 하나는 분리될 수 없는 extrinsic과 systematic 정보로 나타낼 수 있다.

TCM 신호 심벌  $i, \in 0, 1, \dots, 2^{n-1}$ 에 대한 LLR (Log likelihood Ratio)은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$L^i(d_k) = \log \frac{P(d_k=i)}{P(d_k=0)} + \log \frac{\sum_{m=0}^{2^n-1} \sum_{k=0}^{2^n-1} \alpha_{k-1}^{(m)} P(r_k | d_k=i, S_k=m) \delta(i, m, m) \beta_k^i(m)}{\sum_{m=0}^{2^n-1} \sum_{k=0}^{2^n-1} \alpha_{k-1}^{(m)} P(r_k | d_k=0, S_k=m) \delta(0, m, m) \beta_k^0(m)} \quad (1)$$

여기서  $d_k$ 는 터보 TCM 복호기의 입력심벌이다. 식 (1)에서 수신된 신호  $r_k$ 는 독립적으로 systematic과 패리티 부분을 분리시킬 수 없다. 즉,  $P(r_k | d_k=i, S_k=m)$ 은 두 개의 확률로 분리시킬 수 없다. 이것을 다음 식과 같이 요약할 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$L^i(d_k) = L_{P_k} + L_{e \& s_k} \quad (2)$$

결과적으로 디코더 사이의 systematic 정보와 extrinsic 정보는 분리시킬 수 없다. 즉,  $L_{e \& s_k}$ 는 두 개의 항으로 분리시킬 수 없다. 여기서  $L_{e \& s_k}$ 는 입력 비트  $u_k$ 와 관계하여 나타나는 새로운 정보인 외부 부가정보값을 나타내며 시간  $k$ 에서 systematic 데이터와 패리티 비트들에 대한 정보를 가지고 있

다. 외부 부가정보는 반복 복호 과정에서 성능 향상을 시키는 중요한 역할을 하게 된다.

$i$ 번째 반복 복호 과정에서 외부부가정보  $L^i_{e \& s_k}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L^i_{e \& s_k} = L^i(d_k) - L^i_{P_k} \quad (3)$$

본 논문에서 제안하는 터보 TCM의 반복 복호 제어기법은 반복복호에서 성능 향상의 중요한 역할을 하게 되는 외부 정보값  $L^i_{e \& s_k}$ 에 대한 분산값을 이용한다.  $i$ 번째 외부부가정보의 분산값을 구하면 다음과 같다.

$$Var[L^i_{e \& s_k}] = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (L^i_{e \& s_k})^2}{N} - \left( \frac{\sum_{k=0}^{N-1} L^i_{e \& s_k}}{N} \right)^2 \quad (4)$$

외부부가정보값의 증가하는 특성을 살펴보기 위하여  $i$ 번째 MAP 복호기와  $(i-1)$ 번째 MAP 복호기에서 외부 정보값의 분산값을 측정하고 이들 값의 차를 Delta variance라고 정의하면,  $i$ 번째 반복복호에서 Delta variance는 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta Var[L^{(i)}_{e \& s_k}] = Var(L^{(i)}_{e \& s_k}) - Var(L^{(i-1)}_{e \& s_k}) \quad (5)$$

즉, 최대 반복복호의 정지기준은 Delta variance 특성에 기반하여 이루어진다.

그림 2와 3은 반복복호 횟수에 따른 터보 TCM 복호기의 외부정보값  $L^{(i)}_{e \& s_k}$ 에 대한 분산특성과 Delta Variance 특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서

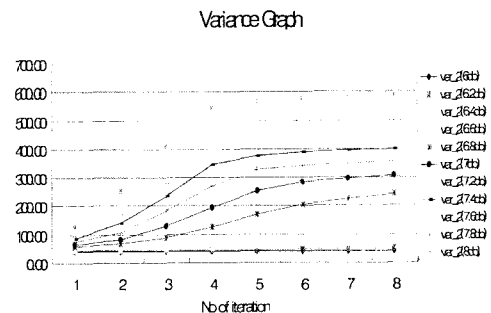


그림 2. 터보 TCM 복호기의 외부부가정보값에 대한 분산특성그래프  
Fig. 2. Characteristics graph of variance according to the extrinsic information.

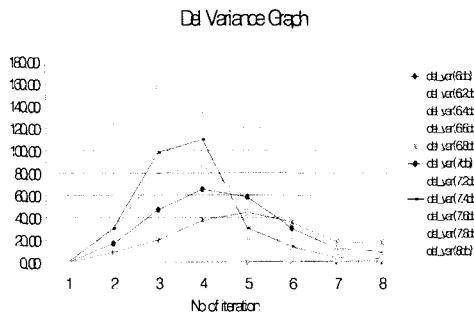


그림 3. 터보 TCM 복호기의 외부부가정보값에 대한 Delta Variance 특성그래프  
Fig. 3. Characteristics graph of delta variance according to the extrinsic information.

구한 값을 그래프로 나타낸 것이다. 그림 2를 살펴보면 터보 TCM 복호기의 반복복호수(No of iteration)를 증가하면 식 (4)에서 구한 Variance 값이 증가함을 보여준다. 특히 오른쪽 범례에서 표시된 db 값이 클수록 Variance 값도 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 3의 그래프를 분석해 보면 반복복호수가 증가할수록 식 (5)에서 구한  $\Delta Var(L^{(i)}_{e \& s_i})$  값은 증가하다가 어느 반복 복호 횟수 시점에서는 감소하게 됨을 보여준다.

그림 4는 반복복호수에 따른 BER 성능 그래프로서 반복복호 횟수가 증가하면 에러율이 작아지고 되고 당연히 성능이 향상됨을 보여준다. 그러나 반복 복호수가 어느 정도 이상에서는 성능향상이 미미함을 알 수 있다. 즉, 어느 정도의 반복복호 이후에

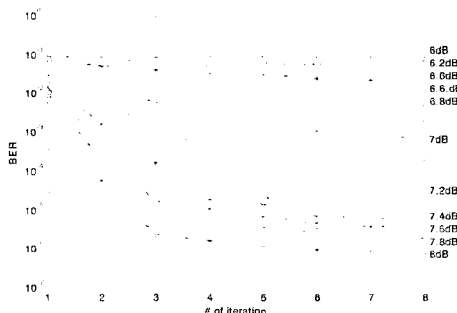


그림 4. 반복복호수에 따른 BER 성능 그래프  
Fig. 4. BER performance graph according to the iteration Number.

는 반복복호를 계속하여도 성능 향상이 되지 않으므로 정지기준이 필요함을 보여주고 있다. 여기서 그림 3과 그림 4를 연관지어 살펴보면 최대 delta variance값을 넘어서게 되는 어느 반복복호수에서는 에리 마루 현상이 나타나므로 반복복호를 계속 진행하여도 더 이상의 성능 향상은 미미하게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 반복복호를 최대 delta variance값이 나타나는 시점에서 멈추자는 것이 본 논문에서 제안하는 임계치 결정 방안이다. 최대 delta variance를 효과적으로 예측하기 위해서는 그림 2, 3의 터보 TCM 복호기의 외부부가정보값의 variance 특성을 이용한다. 즉, 반복복호를 진행하는 도중에 복호기의 출력값에서 반복복호시에 성능 향상의 중요한 역할을 하게 되는 외부 부가정보값의 분산값 특성을 이용하여 그 증가 값이 최대치에 이르렀을 때 반복복호를 멈추게 된다.

$$\Delta Var(L^{(i)}_{e \& s_i}) \leq \max(\Delta Var) \quad i=1,2,3 \dots (6)$$

따라서 궁극적인 임계치 결정값은 다음과 같이 정한다. 즉, 처음 정해진 최대 한계 반복수 이하인 조건에서 외부정보값의 분산값 증가량을 나타내는 delta variance가 전 단계의 값과 비교하여 작게 되면 반복복호를 멈추게 된다.

$$\text{criterion } \Delta Var(L^{(i)}_{e \& s_i}) \leq \Delta Var(L^{(i-1)}_{e \& s_i}), \quad i=2,3 \dots \text{최대 반복수} \quad (7)$$

여기서  $i$ 는 처음 정해진 최대 반복수보다 작아야 하며, 그림 3에서 살펴보면 dB 값이 높을수록 반복수가 작은 값에서 delta variance값이 최대치에 이르는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 높은 dB에서는 반복복호수가 비교적 작게 된다.

그림 5는 제안한 반복복호 제어구조에 대한 블록도이다. 그림 1에서 P. Robertson이 제안한 터보 TCM의 복호기 구조를 간단화한 그림으로서, 본 논문의 제안구조인 그림 5와 비교하여 차이점은 두 개의 TTCM Decoder(S-b-S MAP 복호기) 사이에 반복복호에서 부가정보가 제한되는 부분인 디인터리버 전단에 반복복호를 제어하는 반복복호제어(Control iteration number) 블록을 삽입하였다. 이 부분의 기능은 식 (7)에서 나타난 임계치 값을 계산하여 반복복호를 제어하도록 한다. 즉, 처음 정해진 최대 한계

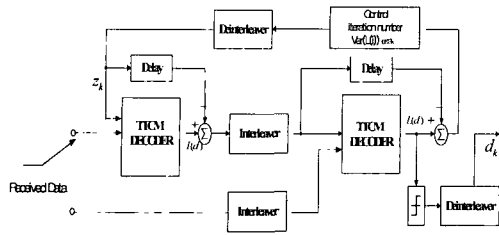


그림 5. 터보 TCM 복호기의 제안하는 반복복호 제어 구조

Fig. 5. Proposed iteration control structure of Turbo TCM decoder.

반복수 이하인 조건에서 외부정보값의 분산값을 비교하여 적당한 값에 이르렀을 때 반복복호를 멈추게 된다. 그림에서처럼 복호기 출력값의 외부정보 분산값을 측정하는 구조로 비교적 간단하게 제어가 이루어진다. 이 방법은 터보 TCM 복호기에서 반복 복호 횟수를 성능 감소 없이 줄이므로 지연과 계산량을 효과적으로 감소시키게 된다. 또한 하드웨어 관점에서도 지수함수 계산이 필요치 않으므로 비교적 간단하게 이루어진다.

### III. 제안기법의 성능비교 분석

제안한 터보 TCM을 위한 반복복호제어기법에 대한 성능 비교분석을 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석한다. 실험을 하기 위한 터보 TCM 복호기는 P. Robertson이 제안한 터보 TCM 인코더 구조와 본 논문에서 제안한 그림 5의 복호기 구조를 이용한다. 또한 모의실험 조건은 AWGN 채널 환경에서 Symbol/frame 크기를 1024/2048을 선택하였고, 랜덤인터리버를 사용하였다. 복호기 알고리즘은 Max-Log-MAP 알고리즘을 사용하였으며 최대 반복한계 반복수는 8회로 하였다. 모의 실험을 통해 반복 복호수에 따른 성능을 그림 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 제안한 반복복호 제어기법 (Adaptive iterative control decoding 그래프)이 반복 복호제어를 하지 않고 4번 고정으로 실험한 기법 (4iter 그래프)에 비하여 성능이 아주 우수하고, 최대 반복수인 8번을 수행한 것(8iter 그래프)과 비교하면 성능이 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 반복복호제어를 하여 실험을 수행하여 본 결과 기존의 최대 반복수(8회) 복호를 했던 기법과 비

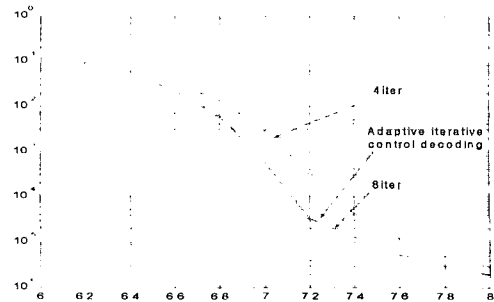


그림 6. SNR에 따른 제안기법의 BER 성능  
Fig. 6. BER performance of proposed method according to SNR.

표 1. 제안된 기법의 평균 반복복호수 비교  
Table 1. Average iteration Number of proposed method.

$E_b/N_o$	평균 반복 복호수 (제안된 기법)	고정된 반복 복호수
6.2	7.98	8
6.4	7.87	8
6.6	7.39	8
6.8	6.69	8
7.0	5.72	8
7.2	5.03	8
7.4	4.64	8
7.6	4.40	8
7.8	4.21	8
8.0	4.02	8

교하여 성능 감소가 거의 없다는 것을 보여준다. 또한 표 1에서 반복복호 회수를 살펴보면 반복 복호 제어기법을 적용하지 않고 최대 반복복호 횟수인 8회 실험한 것에 비하여 반복 횟수면에서 상당한 이득을 볼 수 있다는 것을 알 수 있다. 특히 7 dB를 넘어서면 거의 1/2로 반복 복호 횟수를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

### IV. 결 론

본 논문에서는 전력 제한 및 대역제한 환경에서 효율적이며, 높은 BER 성능을 갖는 터보 TCM에 대하여 반복복호에 따른 지연시간 및 전력을 효과적으로 감소시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 제안된 기법은 터보 TCM 복호기의 출력 정보에 대한

delta variance 특성을 이용한 임계값을 이용하여 적응적으로 반복복호과정을 적당한 횟수에서 정지시킨다. 컴퓨터 시뮬레이션 분석 결과 제안된 정지 기법은 최대 반복 복호를 수행했을 때와 비교하여 커다란 성능 저하가 나타나지 않으며, 평균 반복 복호 횟수를 효과적으로 줄일 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 터보 TCM을 위한 반복 복호 제어기법을 적용함으로써, 전력제한 환경에서 터보 TCM 복호과정의 반복횟수에 따른 지연과 전력 사용을 보다 효율적으로 감소시킬 수 있다.

참 고 문 헌

[1] C. Berrou, A. Glavieux and P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding : Turbo Codes", in *ICC*, pp. 1064-1070, 1993.

[2] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi and F. Pollara, "Serial concatenated trellis coded modulation with iterative decoding: design and performance", *Proc. IEEE Glob. Comm.* 97, pp. 38-43, 1997.

[3] Soonyoung Kim, Jinsu Chang and Moon Ho Lee, "Simple Stop Criterion of Iterative Decoding for wireless Packet Transmission", *IEE Electronics Letters*, vol. 36, no. 24, pp. 2026-2027, Nov. 2000.

[4] Todd A. Summers, Stephen G. Wilson, "SNR Mismatch and Online Estimation in Turbo Decoding", *IEEE Transactions on Communication*, vol. 46, no. 4, pp. 421-423, Apr. 1998.

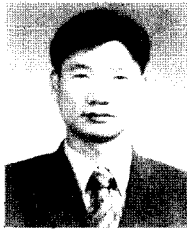
[5] P. Robertson, T. Würz, "Bandwidth-Efficient Turbo Trellis-Coded Modulation Using Punctured Component Codes", *IEEE Journal on selected areas in communications*. vol. 16. no. 2, Feb. 1998.

[6] J. Hagenauer, E. Offer and Lutz Papke, "Iterative Decoding of Binary Block and Convolutional Codes", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 42. no. 2, Mar. 1996.

[7] Rose Y. Shao, Shu Lin and Marc P. C. Fossorier, "Two Simple Stopping Criteria for Turbo Decoding", *IEEE Transactions on Communication*, vol. 47, no. 8, pp. 1117-1120, Aug. 1999.

[8] 이문호, 김순영, 오류정정 이론 - 터보코드의 기본 원리와 응용, 영일, 2001년.

김 순 영



2001년 2월: 전북대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)  
 1987년 3월~현재: KT 인재개발원, 전북동부망운용국  
 2001년 3월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 강사  
 [주 관심분야] 디지털 이동통신, 채널코딩, 인터넷워킹

김 정 수



1996년 2월: 순천대학교 전자공학과 (공학사)  
 1998년 2월: 전북대학교 정보통신공학과 (공학석사)  
 2003년 2월: 전북대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)  
 2002년 6월~현재: KCU 한국사이버대학교 전임강사  
 [주 관심분야] 채널코딩, 디지털 이동통신, 변복조, 무선네트워크

장 진 수



1996년 2월: 전북대학교 정보통신  
공학과 (공학사)

1998년 2월: 전북대학교 정보통신  
공학과 (공학석사)

2001년 8월: 전북대학교 컴퓨터공  
학과 (공학박사)

2002년 3월~현재: 전주공업대학  
컴퓨터정보과 전임강사

[주 관심분야] 채널코딩, 디지털 이동통신, 변복조

이 문 호



1990년 8월: 일본 동경대 전자과  
(공학박사, 통신기술사)

1970년 8월~1980년: 남양문화방  
송(주) 송신소장

1985년 1월~현재: IEEE, Sigma Xi  
Senior member

1997년 3월~현재: 한국공학한림원

정회원

1997년 3월~현재: 정보통신부 정책심의위원

1998년 7월~1998년 8월: 원혜공대 방문 교수

2000년 7월~2000년 8월: 나가오가 과학기술대학 일본  
정부 초청교수

1981년~현재: 전북대학교 전자정보공학부 교수

[주 관심분야] 디지털 이동통신 및 채널코딩, 영상처리