

# 고속 무선 통신을 위한 적응형 터보 시공간 처리를 갖는 터보 부호화된 다중 입출력 시스템

정희원 조 동 균\*, 비회원 김 상 준\*, 박 주 남\*, 정희원 황 금 찬\*

## Turbo Coded MIMO System with Adaptive Turbo Space-Time Processing for High-Speed Wireless Communications

Dong-Kyoon Cho\* *Regular Member*, Sang-Joon Kim\*, Joo-Nam Pak\* *Nonmembers*,  
Keum-Chan Whang\* *Regular Member*

### 요 약

터보 부호와 터보 처리는 무선 단일 입출력 통신 시스템과 마찬가지로 무선 다중 입출력 통신 시스템에서도 제 귀 처리를 통하여 Shannon Limit에 근접하는 방법으로 알려져 왔다. 제귀 처리는 복조와 간섭 제거의 상호 영향을 극대화시킬 수 있으나 터보 부호는 복잡도와 내부의 복호 처리의 지연으로 인해 터보 처리에 사용되지 않고 있다. 본 논문에서는 고속 무선 통신을 위한 적응형 Turbo-PAST 처리를 갖는 터보 부호화된 다중 입출력 시스템과 효율적인 조기 정지 기법으로 E-CRC 기법을 제안한다. 시뮬레이션 결과는 Turbo-PAST가 기존 시스템보다 1.3dB 뛰어나고 제안된 E-CRC 기법은 평균 제귀 횟수 관점에서 터보 처리의 제귀를 약 1회정도 줄이는 것을 보여준다.

Key Words : MIMO; BLAST; Turbo Code.

### ABSTRACT

Turbo coding and turbo processing have been known as methods close to Shannon limit in the aspect of wireless MIMO communications similarly to wireless single antenna communication. The iterative processing can maximize the mutual effect of coding and interference cancellation, but turbo coding has not been used for turbo processing because of the inherent decoding process delay. This paper proposes a turbo coded MIMO system with adaptive turbo parallel space-time (Turbo-PAST) processing for high-speed wireless communications and an enhanced cyclic redundancy check (E-CRC) scheme as an efficient and simple priori stopping criterion. Simulation results show that the Turbo-PAST outperforms conventional system with 1.3dB and the proposed E-CRC scheme effectively reduces the amount of turbo processing iterations from the point of average number of iterations.

### I. 서 론

최근 몇 십 년 동안 MIMO(Multi-Input Multi-Output) 시스템이 고속 무선 통신에서 상당한 단일 사용자 용량으로 인해 많은 관심을 끌어들였다. 특히, D-BLAST 또는 V-BLAST로서 수행되는, BLAST

(Bell-Labs Layered Space-Time) 구조에 기반을 둔 다중 입출력 통신 시스템은 무선 채널에서 전체 전송 파워와 채널 대역폭을 증가시킬 필요 없이 매우 높은 데이터 전송률을 제공할 수 있기 때문에 상당한 관심을 받았다<sup>[1][2]</sup>. 기존의 V-BLAST 수신기는 ZF(Zero-Forcing) 또는 MMSE(Minimum Mean Square Error) 선형 변환과 뒤따르는 부호화된 심볼

\* CITY - Center for Information Technology of Yonsei University

\* 연세대학교 전기전자공학과 통신시스템연구실(dkcho@yonsei.ac.kr)

논문번호 : 030159-0414, 접수일자 : 2003년 4월 15일

\*\*본 연구는 산업자원부 산업기초기술연구개발사업 지원 및 LG전사, 에이디칩스 관리로 수행되었습니다.

에 기반을 둔 가 판정 값을 사용하는 연속 간섭 제거로 구성된 검출기를 채용하고 있다<sup>[4]</sup>.

지금까지 터보 처리는 단일 안테나 시스템과 마찬가지로 다중 입출력 시스템에서 Shannon limit에 근접한 효과적인 방법으로 알려져 왔다. 이러한 재귀 처리는 복호 이득과 간섭 제거 이득의 상호 영향을 극대화시킬 수 있다. [5]에서는 이러한 터보 처리의 구현으로 두 가지의 부호화된 계층 시공간 접근을 제시하였고 송신 및 수신 안테나의 수가 클 때 계층간 부호화가 각 계층 안의 독립된 부호화보다 나은 성능을 제공하는 것을 보여주었다. 전자는 LST-I로 불리고 후자는 LST-II로 불린다. 하지만 [5]에서의 단점은 시스템의 복잡도를 줄이기 위해 계층간 연속 간섭 제거가 사용됨으로써 판정 지연이 커지는 것과 터보 부호 대신에 길쌈 부호를 사용함으로써 부호 이득의 손실을 초래했다는 것이다. [6]에서는 터보 처리의 구현으로 계층간 병렬 연 간섭 제거를 이용한 Turbo-BLAST가 제안되었고 연 간섭 제거를 위한 최적의 해가 제시되었다. 그러나 Turbo-BLAST는 부스트된 간 인터리버를 사용함으로써 Turbo-BLAST는 LST-I에 속하게 되므로 부스트된 부호화를 사용할 필요가 없고 대신 하나의 부호를 사용함으로써 시스템을 간소화시킬 수 있다.

잘 알려진 연속력 부호로서는 길쌈 부호<sup>[7]</sup>와 터보 부호<sup>[8][9][10]</sup> 두 가지의 부호 방법이 있으나 터보 부호는 터보 처리를 위해서는 사용되지 않았다. 그 첫 번째 이유는 재귀 부호를 갖는 재귀 처리는 판정 지연이 늘어나게 되기 때문이었다. 만약 터보 부호의 재귀 횟수가 감소하면 판정 지연은 줄어들지만 터보 부호의 이득은 길쌈 부호의 이득보다 작아지게 될 것이다. [5]에서는 심지어 터보 부호의 경우 하나의 재귀는 세가지 처리 즉 DDFSE에 있는 MAP 처리, 첫번째 복호기에 의한 터보 부호 그리고 두번째 복호기에 의한 터보 부호의 전체 순환으로 언급되었다. 두 번째 이유는 MAP 복호기로부터 패러티 심볼을 위한 연 출력을 얻기가 쉽지 않기 때문이었다.

본 논문은 패러티 부호의 대수 최우도 또는 정보 부호의 대수 최우도도를 위해 사용된 파라미터들로부터 쉽게 구해질 수 있음을 보이고 판정 지연을 줄이고 부호 이득을 증가시키기 위해 Turbo-PAST(Turbo Parallel Space-Time) 처리를 갖는 터보 부호화된 다중 입출력 시스템을 제안한다.

[5]와 [6]에서 각 프레임은 고정된 재귀횟수를 갖고 부호되었다. 그러나 대부분의 프레임들은 수렴하

기에 보다 적은 재귀횟수를 필요로 한다. 만약 복호기가 비트들이 올바르게 추정된 후에 즉시 각 프레임에 대한 재귀를 종료시킨다면 평균 연산량은 성능의 저하 없이 충분히 감소될 것이다. 지금까지 터보 부호의 정지기법에 대해 여러 가지 기법들이 제안되어왔다<sup>[11][12]</sup>. 최근까지 제안된 기법들은 크게 두 가지로 분류된다. 하나는 CE(Cross Entropy), SCR(Sign Change Ratio) 그리고 SDR(Sign Difference Ratio)과 같은 엔트로피 관점에서 수렴하는 특성을 이용하는 것이다. 다른 하나는 CRC(Cyclic Redundancy Check)와 같은 부가 비트들을 이용하는 것이다. CE, SCR 그리고 SDR 기법은 프레임 오류를 검출하는 것이 아니라 재귀 부호를 정지시키는 것에 초점을 두고 있다. CRC 기법은 프레임 오류를 거의 정확하게 검출할 수 있다. 그리고 CRC 기법은 추가 비트를 필요로 하기 때문에 대역폭 효율과 상충되지만 제시된 시스템에서는 프레임의 길이가 안테나 수에 비례하여 커지므로 상대적으로 신호 전력 손실이 줄어든다. 따라서 본 논문에서는 부호된 프레임의 신뢰를 결정하기 위해 Turbo-PAST 시스템에 유용한 간단한 정지 기법으로, E-CRC(Enhanced Cyclic Redundancy Check) 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 적응형 Turbo-PAST 구조의 기본 개념을 기술하였고 III절에서는 연속력 MAP 블록 구조와 E-CRC 기법에 대해 자세히 설명하였고 시뮬레이션 결과와 분석은 IV절에 나타내었다. 그리고 V절에서는 요약과 결론을 제시하였다.

## II. 적응형 Turbo-PAST 시스템 구조

### 1. 기본 개념

그림1과 그림2에서는 PAST(PARallel Space-Time)로 명명된 부호화된 병렬 시공간 접근을 보여

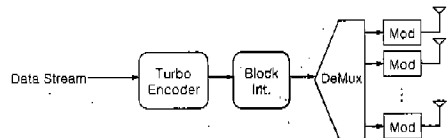


그림 1. 송신기 구조

준다. 이러한 접근에서 정보는 먼저 CRC비트를 붙이고 부호화되고 인터리빙되고 N개의 부호화된 부

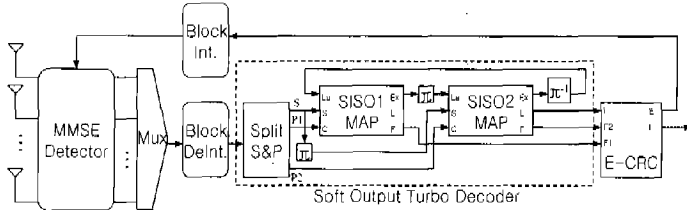


그림 2. 적응형 Turbo-PAST 수신기 구조

스트림으로 할당되는데 각각은 독립적으로 심볼로 매핑된다. 수신기에서는 N개의 정보 부스트림이 검출되고 재할당되며 디인터리빙되고 복호되고 그리고 E-CRC 기법으로 재귀 여부가 확인된다.

터보 부호는 두 개의 동일한 RSC(Recursive Systematic Convolutional) 부호를 갖는다.  $d_k, k \in \{1, \dots, N\}$ 를 정보 비트라고 하고  $c_k = (c_{1k}, c_{2k})$ 를 대응된 부호화된 패리티 비트라고 가정한다. 유사 정적 레일리 페이딩 채널에서 다중 입출력 전송을 가정하면 MMSE 검출기에서 나오는 신호들은  $d_k$ 에 대응되는  $(x_k, y_{1k}, y_{2k})$ 이다. 여기서  $x_k$ 는 정보 신호이고  $y_{1k}$ 와  $y_{2k}$ 는 각각 RSC1과 RSC2에 대한 패리티 신호들이다. 이 신호들은  $d_k$ 를 추정하기 위해 SISO(Soft-Input Soft-Output) Log-MAP 복호기 SISO1과 SISO2로 보내진다.

그림 2에서 MMSE 검출기는 간섭 제거 기능과 결합된 MMSE 처리를 나타낸다. MMSE 검출기에 대한 자세한 사항은 [6]에 잘 설명되어 있다. Foschini는 제층 시공간 구조에서 ZF보다 MMSE (또는 maximum SNR)를 사용하면 잠재적 이득을 얻을 수 있음을 지적했다<sup>[1]</sup>. [3]에서처럼 제층 시공간 구조는 비 검출된 제층이 항상 가장 강한 수신 신호대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)를 갖도록 하기 위해서 N개의 정보 부스트림을 정렬해야 하는 것을 가정하고 있다. 그러나 Turbo-PAST에서 MMSE 검출기는 정렬 없이 동시에 N개의 정보 부스트림을 검출하기 때문에 판정 지연을 감소시킬 수 있다.

일반적으로 판정 오류의 영향을 최소화시키고 또한 검출과 복호 성능을 향상시키기 위해 PAST 구조에 터보 처리의 사용이 적용되었다. 그림 2에서 MMSE 검출기와 터보 복호기는 상호 연 정보를 제공한다. 터보 처리의 핵심은 터보 복호기의 부가 정보와 LLR을 어떻게 다루는가에 있다. [5]와 [6]에서는 터보 복호기의 연 출력으로서 부가 정보가 사용

되었지만 본 논문에서는 그림 2에서처럼 연 출력으로서 LLR을 사용하였다. 그리고 부가 정보는 첫 번째 터보 처리 세기 때 초기화되고 다음 터보 처리 때는 계속적으로 사용된다. 시물레이션을 통해서 연 출력으로서 LLR을 사용하고 부가 정보를 처음 터보 처리 때만 초기화함으로써 Turbo-PAST 시스템 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

## 2. MMSE 검출기

지연 확산이 없을 때, 신호처리 간격에서 수신된 신호의 이산 시간 모델은 다음과 같다.

$$r = Ha + v \quad (1)$$

여기서  $H$ 는 채널 임펄스 응답 행렬이고, 벡터  $a$ 는 전송된 정보이고,  $r$ 은 수신된 벡터이고 가우시안 잡음 벡터는  $v$ 이다. 잡음 벡터의 구성성분은 평균 0와 분산  $\sigma^2$ 을 갖는 무상관 복소 백색 가우시안 랜덤 변수들이다. 채널 행렬  $H$ 는 한 프레임 동안 일정하지만 한 프레임에서 다른 프레임으로 넘어가는 동안 변하는 것으로 가정한다. 더군다나  $H$ 의 계급은  $\min(M, N)$ 으로 가정한다. 풍부한 분산 환경에서는 다수의 전송 및 수신 안테나가 있을 때 이러한 조건은 거의 충족된다.

$a_k$ 를 검출하고자 하는 신호라고 하면 식 (1)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$r = h_k a_k + H_k a_k + v \quad (2)$$

여기서  $H_k = [h_{1k}, h_{2k}, \dots, h_{k-1k}, h_{k+1k}, \dots, h_{Nk}]$ 와  $a_k = [a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{k-1k}, a_{k+1k}, \dots, a_{Nk}]$ 는 각각 간섭 채널 행렬과 k번째 부스트림을 위한 간섭 부스트림의 벡터이다.

[6]에서 동일 안테나 간섭 (CAI: Co-Antenna Interference)을 극복하기 위하여 검출기와 연 간섭 제거기의 결합된 사용에 근거를 둔 다중 부스트림 수신기가 제안되었는데 이 수신기는 MMSE 기법을 사용함으로써 간섭 추정과 선형 검출기의 가중치를 최적화시킨다. 간섭 제거 수신기에서 CAI는 선형 빔 형성 출력으로부터 제거될 수 있다.

$$y_k = w_k^H r - u_k \quad (3)$$

여기서  $u_k$  는 간섭 부스트림의 선형 결합이다.

식 (2)와 식 (3)이 주어지면, 기증치 벡터  $w_k$  와  $u_k$  는 다음의 비용 함수를 최소화시킴으로써 찾을 수 있다.

$$(\hat{w}_k, \hat{u}_k) = \arg \min_{(w_k, u_k)} E[\|a_k - y_k\|^2] \quad (4)$$

여기서 기대값은 잡음과 데이터 열의 통계에 대한 것이다.

식 (4)에 대한 해는 다음과 같이 [6]에서 제시하였다.

$$\begin{aligned} \hat{w}_k &= (h_k h_k^H + H_k F H_k^H + \sigma^2 I_M)^{-1} h_k \\ \hat{u}_k &= w_k^H H_k E[a_k] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $F = I_{N-1} - \text{Diag}\{E[a_k]E[a_k]^H\}$ 이다.

### III. 적용형 Turbo-PAST 기법

#### 1. 연 출력 터보 복호기

전송된 스트림의 사후 확률을 제공하고 간섭 부스트림의 기대값을 얻기 위해서 터보 복호기가 사용되었다. 그림 2에 나타난 MAP 블록은 연 입출력 MAP 복호기이다. MAP 블록은 다음과 같은 입출력을 갖고 있다.

**A priori(La)** - 대수 최대우도 형식으로 된 원 데이터의 사전 정보

**Systematic(S)** - 수신된 체계화된 정보 부호

**Code(C)** - 수신된 부호화된 패러티 부호

**LLR(L)** - MAP 블록 입력에 의해 조건된 원 데이터의 대수 최대우도

**Extrinsic(Ex)** - 원 데이터의 부가 정보

**Code LLR(F)** - MAP 블록 입력에 의해 조건된 부호화된 패러티 부호의 LLR.

본 논문에서는 MAP 알고리즘에 대한 유도를 반복하지는 않고 단지 결과를 언급할 것이고 자세한 사항은 [13]에 잘 나타나 있다. MAP 알고리즘의 목표는 각 정보 비트  $d_k$ 가 1이 될 사후 확률 (APP: A Posteriori Probability) 과 0이 될 사후 확률의 LLR을 제공하는 것으로서 결과는 다음과 같다.

$$L(\hat{d}_k) = \log \left[ \frac{\sum_m a_k^m \delta_k^{1,m} \beta_{k+1}^{(1,m)}}{\sum_m a_k^m \delta_k^{0,m} \beta_{k+1}^{(0,m)}} \right] \quad (6)$$

여기서 확률 함수는 다음과 같다.

$$\delta_k^{i,m} = P(d_k = i, S_k = m | R_k^N) \quad (7)$$

$$a_k^m = P(R_k^{k-1} | S_k = m) \quad (8)$$

$$\beta_{k+1}^{(i,m)} = P(R_{k+1}^N | S_{k+1} = f(i, m)) \quad (9)$$

여기서  $f(i, m)$ 는 입력  $i$ 와 상태  $m$ 이 주어질 때의 다음 상태를 나타낸다.

부호기는 체계적이고 데이터와 패러티에 미치는 잡음은 독립적이므로 식 (7)에서 가지 전이 확률은 현재 상태에 독립적이다. 따라서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$L(\hat{d}_k) = L(d_k) + L_c(x_k) + L_c(\hat{d}_k) \quad (10)$$

여기서 각 시간  $k$ 에 대하여  $L(d_k)$ 은 사전 확률 비율이고  $L_c(x_k)$ 는 채널의 LLR이고  $L_c$ 는 출력 부가 정보를 나타낸다.

같은 방법으로 정보 비트  $d_k$ 에 대응하는 각 패러티 비트  $p_k$ 의 LLR을 얻을 수 있다.

$$L(\hat{p}_k) = \log \left[ \frac{\sum_m a_k^m \gamma_k^m \beta_{k+1}^{(1,m)}}{\sum_m a_k^m \gamma_k^m \beta_{k+1}^{(0,m)}} \right] \quad (11)$$

패러티 비트  $p_k$ 에 대한 확률 함수는 다음과 같다.

$$\gamma_k^{j,m} = P(p_k = j, S_k = m, R_k) \quad (12)$$

$$a_k^m = P(R_k^{k-1} | S_k = m) \quad (13)$$

$$\beta_{k+1}^{(j,m)} = P(R_{k+1}^N | S_{k+1} = g(j, m)) \quad (14)$$

여기서  $g(j, m)$ 는 패러티  $j$ 와 상태  $m$ 이 주어질 때의 다음 상태를 나타낸다.

데이터와 패러티에 미치는 잡음은 독립적이므로 식(12)에서 가지 전이 확률은 현재 상태와 독립적이다. 따라서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$L(\hat{p}_k) = L_c(y_k) + L_c(\hat{p}_k) \quad (15)$$

식(7-9)와 식(12-14)에 따르면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$a_k^m = a_k^m \quad (16)$$

$$\beta_{k+1}^{(j,m)} = \beta_{k+1}^{(i,m)} \quad (17)$$

$$\gamma_k^{j,m} = \delta_k^{(j,m),m} \quad (18)$$

여기서  $h(j, m)$ 는  $j$ 와 상태  $m$ 에 의해 결정되는 입력  $i$ 를 나타내고  $g(j, m)$ 는  $f(i, m)$ 와 동일하다.

따라서 각 패러티 비트  $p_k$ 에 대한 APP의 대수 비율은 데이터  $d_k$ 의 LLR을 위해 사용된 값들을 사용하여 다음과 같이 바로 얻을 수 있다.

$$L(\hat{p}_k) = \log \left[ \frac{\sum_m a_k^m \delta_k^{(1,m),m} \beta_{k+1}^{(1,m)}}{\sum_m a_k^m \delta_k^{(0,m),m} \beta_{k+1}^{(0,m)}} \right] \quad (19)$$

간접 부스트림의 기대값은 다음 관계식을 이용하여 연 출력 터보 부호기로부터 얻어진다.

$$\Pr(a = \pm | observation) = \frac{\exp(L(a))}{1 + \exp(L(a))} \quad (20)$$

여기서 심볼의 LLR,  $L(a)$ 는 MAP 터보 부호기의 연 출력이다. 심볼  $a$ 의 기대값은 다음과 같다.

$$E[a] = \tanh(L(a)/2) \quad (21)$$

앞에서 이미 언급했듯이 본 논문에서는 연 출력으로서 부가 정보<sup>[5][6]</sup> 대신에 터보 부호기의 연 출력 LLR을 사용하였다.

### 2. 터보 처리를 위한 효율적 정지 기법

$i$ 번째 터보 처리에 있어서  $L_a^{(i)}(d_k)$ 와  $L_c^{(i)}(d_k)$ 는 각각 데이터  $d_k$ 의 사전 정보와 부가 정보를 나타낸다. 이때 터보 부호기의 출력으로서 LLR은 다음과 같다.

$$L^{(i)}(d_k) = L_a^{(i)}(d_k) + L_c(x_k) + L_c^{(i)}(d_k) \quad (22)$$

식 (10)에 따르면  $d_k$ 의 LLR은 다음과 같은 세가지 추정으로 이루어진다. 채널로부터 직접 얻어지는  $L_c(x_k) = 2x_k/\sigma^2$ , 사전 값  $L_a^{(i)}(d_k)$  그리고 부호 구성에 의해 얻어지는  $L_c^{(i)}(d_k)$ . 한 프레임에서 비트 오류의 개수를  $N_{ber}$ 이라고 가정한다. 반복된 시뮬레이션으로부터 다음의 관찰들을 얻을 수 있다<sup>[12][14]</sup>.

1) 좋은 프레임에서는  $i$ 가 증가함에 따라

$E[|L_a^{(i)}(d_k)|]$ 와  $E[|L_c^{(i)}(d_k)|]$  모두 증가한다.  $N_{ber}$ 이 0에 근접할 때  $E[|L_a^{(i)}(d_k)|]$ 와  $E[|L_c^{(i)}(d_k)|]$ 는  $E[|L_c(x_k)|]$ 보다 상당히 커진다. 결국  $L^{(i)}(d_k)$ 는 주로  $L_a^{(i)}(d_k) + L_c^{(i)}(d_k)$ 에 의해 결정된다.

2) 나쁜 프레임에서는  $E[|L_a^{(i)}(d_k)|]$ 와

$E[|L_c^{(i)}(d_k)|]$  모두 상당히 증가하지 않고  $E[|L_c(x_k)|]$ 에 근접하거나 보다 작아진다.

3) 좋은 프레임에서는  $i$ 가 증가함에 따라  $N_{ber}$ 은 0으로 간다.

4) 나쁜 프레임에서는  $i$ 가 증가함에 따라  $N_{ber}$ 은 높은 값에 머문다.

관찰 2)와 4)는  $N_{ber}$ 이 성능 저하 없이 재귀를 정지시키는 것에 대한 표지임을 나타낸다. 하지만 실제 시스템에서  $N_{ber}$ 을 알 수 없지만  $N_{ber}$ 의 변화 유무는 CRC의 레지스터를 참조함으로써 추정할 수 있다. 결론적으로 CRC의 레지스터를 참조함으로써 오류가 존재하는 프레임의 반복 재귀 부호를 정지

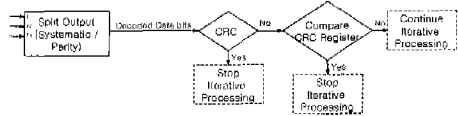


그림 3. E-CRC 기법

시킬 수 있게 된다. 이러한 정지 기법은 그림 3에 잘 나타나 있다.

본 논문에서는 Turbo-PAST 처리의 효율적인 조기 정지 기법으로, 복호된 프레임의 신뢰도를 판정하기 위한, E-CRC 기법을 제안하였다. 기존의 CRC 기법은 프레임에 오류가 존재할 경우 최대 재귀 횟수만큼 재귀 부호를 처리하지만 제안된 E-CRC 기법은 프레임에 오류가 존재할 경우도 간단한 확인을 통하여 성능의 저하 없이 재귀를 정지시킬 수 있다. 또한 제안된 E-CRC 기법은 추가의 메모리를 필요로 하지 않고 채널의 대역폭이 일정할 때 제시된 시스템에서는 전송 안테나의 수가 증가할수록 터보 부호의 블록 크기도 증가하여 채널 이득이 증가할 뿐만 아니라 CRC 비트에 의한 정보 손실도 감소하므로 제시된 시스템에 적합한 기법이라고 할 수 있다.

## IV. 성능 결과

### 1. 시뮬레이션 성능 기준과 가정

지금까지 기술된 E-CRC 기법을 갖는 적응형 Turbo-PAST 시스템의 성능을 설명한다. 송신 안테나 8개와 수신 안테나 8개를 갖는 시스템을 고려하였다. 성능 측정은 유사 정적 레일레이 페이딩 채널에서의 프레임 오류(FER: Frame-Error Rate)를 기반으로 하였다. 가능한 가장 좋은 성능에 접근하기 위해 수신기에서 채널 정보를 완벽하게 추정할 수 있다고 가정하였다. 재귀 기법은 수치적으로 성능 분석이 어렵기 때문에 결과는 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해서 얻었다. FER은 40,000번의 채널 실험을 통해 평균하였다. 각 안테나당 블록은 400개의 정보 비트를 포함한다. 편이상 변조는 QPSK로 하였으며 발생기  $(G_1, G_2) = (13, 15)$ 을 갖는 Turbo율 1/3인 터보 부호를 편정렬하여 부호율 1/2인 터보 부호를 사용하였고 CRC 부호는 다음과 같은 발생기  $D^{24} + D^{23} + D^6 + D^5 + D + 1$ 을 사용하였다.

### 2. 적응형 Turbo-PAST 시스템 성능

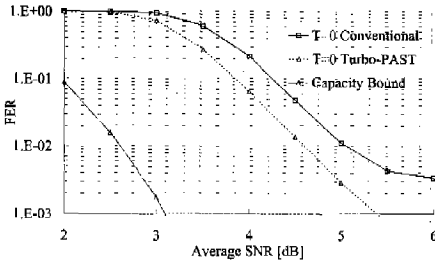


그림 4. 연출력으로서 LLR을 사용하는 Turbo-PAST 시스템의 성능

그림 4는 연출력으로서 부가 정보를 사용하는 기존의(Conventional) 시스템과 비교하여 제안된 T=L Turbo-PAST 시스템의 성능을 보여준다. 여기서 L은 터보 복호기의 내부 재귀 횟수를 나타낸다. Turbo-PAST 시스템에서 터보 처리 재귀 횟수는 충분한 성능 수렴을 고려하여 8로 고정하였다. 용량의 한계는 기정된 주파수 효율 R(여기서는 R=N)이 각각 정의된 채널 용량에 의해 지원되지 못할 확률로 정의된다[1][3].

T=0 Turbo-PAST의 성능은 10% FER을 기준으로 용량 한계와 1.8dB 차이가 나고 1% FER을 기준으로로는 1.9dB의 차이를 보인다. 10% FER을 기준으로 T=0 Turbo-PAST 시스템은 T=0 Conventional 시스템보다 약 0.41 dB의 성능 향상을 보인다. 연출력으로서 부가 정보 대신에 LLR을 사용함으로써 나타나는 이득은 그림 4에서 볼 수 있듯이 연 간섭 제거와 결합된 MMSE 검출기에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 다시 말하자면 간섭 제거에 사용되는 심볼의 신뢰도는 부가 정보 보다 LLR과 밀접한 관계가 있다. 이러한 이유 때문에 연출력으로 부가 정보를 이용하는 Conventional 시스템은 제안된 Turbo-PAST 시스템보다 높은 FER에서 오류 한도를 갖는다.

그림 5는 각 터보 처리 재귀 때마다 터보 복호기의 부가 정보를 초기화하는 Conventional 시스템과 비교한 Turbo-PAST 시스템의 성능을 보여준다. 10% FER을 기준으로 T=0 Turbo-PAST 시스템은 T=0 Conventional 시스템보다 약 1.36dB의 성능 향상을 보이고 T=1 Turbo-PAST 시스템은 T=1 Conventional 시스템보다 약 0.15dB의 성능 향상을 보인다. 이는 처음 터보 처리 재귀 때만 터보 복호기의 부가 정보를 초기화함으로써 터보 처리 재귀 횟수가 증가할 때마다 터보 복호기의 재귀 횟수

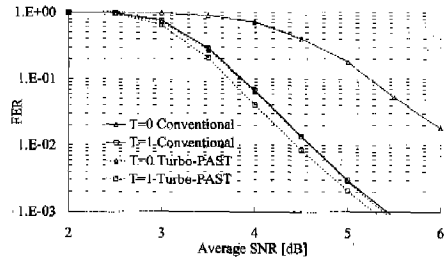


그림 5. 첫 터보 처리 재귀 때만 부가 정보를 초기화하는 Turbo-PAST 시스템의 성능

가 증가하는 효과를 갖기 때문이다. 심지어 터보 복호 재귀가 없는 T=0 Turbo-PAST 시스템의 성능이 터보 복호 재귀가 존재하는 T=1 Conventional 시스템의 성능과 유사하게 나타난다.

터보처리에서는 터보복호가 완료되는 시점이 곧 터보처리가 완료되는 시점이므로 터보처리가 완료되지 않으면 터보복호는 최대재귀회수만큼 수행되므로 터보복호의 정지기법은 중요하지 않게 된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 터보복호 정지기법을 연출력 Turbo-PAST 시스템에 적용하여 제안된 E-CRC 기법과 비교하였다. 그리고 CRC 기법의 정보 전력 손실을 고려하기 위해 정보당 평균 SNR 기준으로 살펴보았다.

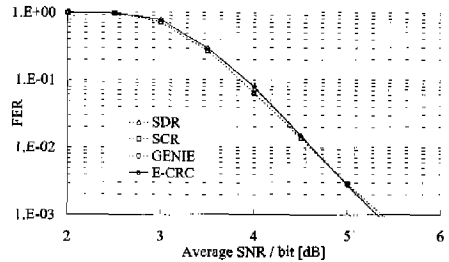


그림 6. 다양한 정지 기법들의 FER 성능

그림 6은 FER 관점에서 E-CRC 기법의 성능을 보여준다. [5]에 의하여 여러 가지 정지기법들을 T=0 Turbo-PAST 시스템에 적용하였다. 성능의 비교를 위해 최대 터보 처리 재귀의 횟수는 8로 고정하였다. SCR, SDR 그리고 E-CRC 세 가지의 정지 기법이 연구되었다. SCR 기법에 대하여 파라미터  $q$ 는  $10^3$ 으로 설정하였고 SDR 기법에 대하여 파라미터  $p$ 는  $10^4$ 으로 설정하였다. "GENIE" 경우는 정보 비트를 수신단에서 알고 있고 재귀는 프레임

이 올바르게 복호된 즉시 정지되는 경우로서 모든 가능한 기법들의 한계를 보여준다. 그림 6으로부터 제안된 E-CRC 기법은 FER 측면에서 부가 비트로 인한 손실이 미약하게 나타나지만 SCR과 SDR 기법처럼 효율적임을 볼 수 있다. 그림에서 정보 비트당 평균 신호 대 잡음비가 5dB 이상에서 E-CRC의 성능이 다른 기법보다 우수하게 나타나는데 이는 채널의 대역폭이 일정하다고 가정할 때 CRC부가 비트로 인한 정보 비트 프레임의 길이가 감소되어 나타나는 현상이다.

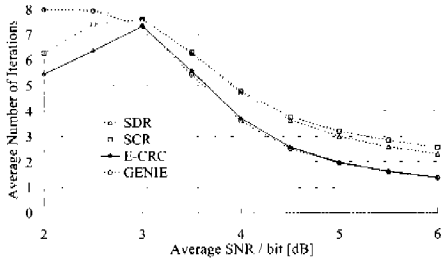


그림 7. 다양한 정지 기법들의 정보 비트당 평균 SNR에 따른 평균 재귀 횟수

그림 7은 정보 비트당 평균 SNR에 따른 각 기법들의 평균 재귀 횟수를 보여준다. E-CRC 기법이 평균 재귀 횟수 관점에서 GENIE와 같이 효율적이고 SCR과 SDR 기법과 비교하여 평균 재귀 횟수가 1회 이상 줄어들었음을 관찰할 수 있다. 또한 E-CRC 기법은 낮은 SNR 영역에서 기존의 SCR 정지 기법보다 약 1회 이상 터보 처리 재귀의 횟수를 효율적으로 줄일 수 있다. 이는 낮은 SNR에서 제안된 E-CRC 기법이 효율적으로 터보 처리를 정지시키기 때문이다.

### V. 결론

고속의 MIMO 시스템에서 관성 지연을 줄이면서 Shannon limit에 근접하는 성능을 나타내는 터보 처리 시스템의 구조는 많은 관심을 끌었다. 본 논문에서는 관성 지연을 줄이고 부호 이득을 향상시키기 위해 고속 무선 통신을 위한 터보 부호화된 MIMO 시스템에서 효율적인 적응형 Turbo-PAST 수신기 구조를 발전시켰다. 각 재귀 때마다 본 논문에서 제시한 간단한 복호 단계를 통한 연율력 LLR이 MMSE 검출기를 위한 연 정보로서 사용되었다. 그리고 첫 재귀 때만 터보 복호기의 부가 정보를

초기화함으로써 터보 재귀를 터보 처리와 통합하였다. 또한 Turbo-PAST 시스템에서 복호된 프레임의 신뢰도를 결정하기 위해 CRC의 레지스터를 비교하는 효율적이고 간단한 E-CRC 기법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 T=0 Turbo-PAST 시스템은 최대한 관성 지연을 줄이면서 T=0 Conventional 시스템보다 약 1.36dB 성능을 향상시켰으며 제안된 E-CRC 기법은 낮은 SNR에서 성능 저하 없이 평균 재귀 횟수 관점에서 기존의 정지 기법보다 약 1회 이상 터보 처리 재귀의 횟수를 효율적으로 줄일 수 있다는 것을 보여주었다.

### 참고 문헌

- [1] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41-59, Autumn 1996.
- [2] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [3] G. J. Foschini, G. D. Golden, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, "Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 17, pp. 1841-1852, Nov. 1999.
- [4] G. D. Golden, G. D. Foschini, R. A. Valenzuela and P. W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using the VBLAST space-time communication architecture," *Electronic Letters*, vol. 35, no. 1, pp. 14-15, Jan. 1999..
- [5] Sirikiat Lek Ariyavitakul, "Turbo Space-Time Processing to Improve Wireless Channel Capacity", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 8, Aug. 2000.
- [6] M. Sellathurai and S. Haykin, "Joint Beamformer Estimation and Co-Antenna Interference Cancellation for TURBO- BLAST," *ASSP 2001*, vol. 4, pp. 2453- 2456, 2001.

