

# IEEE 802.16e Mobile WiMax 시스템에서 MIMO-OFDM의 터보 처리를 위한 조기 정지 기법

정희원 황종윤\*, 조동균\*\*, 황금찬\*

## An Early Stopping Criterion for Turbo Processing of MIMO-OFDM in IEEE 802.16e Mobile WiMax System

Jong Yoon Hwang\*, Dong-Kyoon Cho\*\*, Keum-Chan Whang\* *Regular Members*

### 요약

본 논문은 MIMO-OFDM 시스템에서 터보 처리 기법 (Turbo-BLAST)을 위한 새로운 조기 정지 기법을 제안한다. 터보 처리 기법의 높은 복잡도를 줄이기 위해서는 외부 반복 횟수를 줄이는 일이 필수적이다. IEEE 802.16e Mobile WiMax와 같은 시스템에서는 전송된 데이터 버스트의 마지막 인코딩 패킷을 제외하면 CRC 비트가 부가되지 않는다. 따라서 이러한 시스템에서는 CRC 비트의 도움 없이 반복을 종료할 수 있는 조기 정지 기법이 필요하다. 제안된 기법은 수신된 패리티 비트들과 수신된 정보 비트들로부터 재 부호화된 패리티 비트들 간의 부호 변화를 관찰함으로써 수행된다. 또한, IEEE 802.16e와 같이 tail-biting 부호를 가지는 시스템의 경우에 재 부호화의 복잡도를 절반으로 줄이는 방법이 제안된다. 컴퓨터 모의실험 결과는 제안된 조기 정지 기법이 종래의 조기 정지 기법에 비해 더 적은 수의 평균 반복 횟수를 가지고 GENIE aided 기법과 동등한 수준의 성능을 가짐을 보인다.

**Key Words :** MIMO-OFDM, Turbo processing, Turbo-BLAST, Stopping criteria, IEEE 802.16e WiMax

### ABSTRACT

In this paper, we propose a new stopping criterion for the turbo processing (Turbo-BLAST) of MIMO-OFDM system. To reduce the high computational complexity of turbo-BLAST, it is desirable to lessen the outer-loop iteration number. In a system such as IEEE 802.16e Mobile WiMax, no CRC bits are available except the last encoding packet of a transmitted burst, so early stopping criteria without the help of CRC bits are needed. The proposed criterion counts the sign differences between received parity bits and the re-encoded parity bits from received information bits. With the tail-biting code which is accepted for IEEE 802.16e, a method that the re-encoder operates at half complexity is also proposed. Computer simulations show that the proposed stopping criterion approaches the performance of GENIE aided criterion with less average number of iterations than the other early stopping criteria.

### I. 서론

대역폭의 효율적인 사용과 증가된 전송 용량, 그

리고 심볼간의 간섭(inter-symbol interference; ISI)에 강한 특성으로 인하여 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing; OFDM)

\* 연세대학교 전기전자공학과 통신시스템 연구실 (donhwang@yonsei.ac.kr, kcwhang@yonsei.ac.kr)

\*\* 삼성전자 정보통신총괄 통신연구소 공통기술 Lab. (dkyoon.cho@samsung.com)

논문번호 : KICS2007-01-035, 접수일자 : 2007년 1월 29일, 최종논문접수일자 : 2007년 6월 3일

방식과 결합된 MIMO (multiple-input-multiple-output) 시스템은 IEEE 802.16e 모바일 와이맥스 시스템과 같은 무선 멀티미디어 서비스의 기본 기술로 채택이 되었다. 이러한 MIMO 시스템의 이론적인 최대 전송 용량에 근접하기 위한 가장 강력한 방법 중의 하나로 터보 처리 (turbo-processing) / Turbo-BLAST (Bell Labs layered space-time) 구조가 제안되었다<sup>[1],[2]</sup>. 터보 처리 방법은 획기적이었던 터보 복호기의 재귀 처리 알고리즘을 MIMO 수신기에 적용한 것으로 MIMO 검출기와 SISO (soft-input-soft-output) 복호기의 상호 효과를 이용하는 효과적인 방법이다. 그러나, 터보 처리의 단점은 송수신 안테나의 수와 modulation order, 그리고 부호의 constraint length에 지수적으로 비례하여 증가하는 demapping과 복호시의 복잡도이다. 이러한 터보 처리의 복잡도를 줄이기 위해서는 터보 처리 시의 외부 반복 횟수를 줄이는 일이 필요하다. 그러나, 모바일 와이맥스와 같은 시스템에서는 순환 잉여 검사 (cyclic redundancy check; CRC) 비트들을 매번 전송되는 인코딩 패킷에 부가하지 않는다. 따라서 터보 처리의 최대 외부 반복 횟수에 도달하기 전에 CRC 비트를 사용하지 않고 외부 반복을 종료할 수 있는 조기 정지 기법의 채택이 필요하게 된다. 종래에 제안된 조기 정지 기법으로 CE (Cross entropy)의 기본 개념을 이용한 SCR (sign change ratio)과 HDA (hard decision aided)라고 하는 두 가지 정지 기법이 있다<sup>[3],[4]</sup>. 또한 SCR 기법을 확장한 SDR (sign difference ratio)이라는 기법이 제안되었다<sup>[5]</sup>. 그러나, 이러한 기법들을 구현하기 위해서는 SISO 복호기의 출력을 저장하기 위한 추가적인 저장소와 복잡한 하드웨어의 추가가 필요하다. 본 논문에서는 MAP (maximum a posteriori) 복호를 터보 처리 시스템에 적용한 새로운 정지 기법을 제안한다. 제안하는 새로운 정지 기법은 복호된 패리티 비트들과 수신된 정보 비트들을 이용하여 재 부호화 된 패리티 비트들을 서로 비교한다. 이 방법은 추가의 부호화 블럭을 필요로 하지만 터보 처리의 외부 반복 횟수를 줄임으로서 계산의 복잡도를 획기적으로 줄일 수 있게 된다. 또한 적용되는 시스템이 IEEE 802.16e 모바일 와이맥스와 같이 tail-biting 부호를 사용하는 경우<sup>[6]</sup>, 재부호화의 부담을 절반으로 줄일 수 있는 부호화 방법이 제안된다.

이 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 터보 처리 MIMO 시스템의 모델을 제시하고, 3절에서는 새로운 정지 기법과 이 정지 기법에 적합한

tail-biting 재부호화 구조가 제안되고, 4절에서는 모바일 와이맥스 시스템에 적용한 컴퓨터 모의실험 결과가 제시되며, 5절에서는 본 논문의 결과를 제시한다.

## II. 터보 처리 MIMO 시스템 모델

본 절에서는 송수신단에서 다중 안테나를 사용하는 터보 처리 MIMO 시스템을 정의하고 수신된 신호를 처리하기 위해 MIMO 검출기와 SISO 복호기를 갖는 터보 처리를 고려한다.  $M_T$  개의 전송 안테나와  $M_R$  개의 수신 안테나를 가지고 1/2 rate의 duo-binary RSC (recursive systematic convolutional) 부호의 tail-biting 터보 부호를 가지는 터보 처리 시스템을 가정한다. 부호화된 패킷의 길이는  $L$ 이며 정보 비트는  $b(i)$ ,  $i \in \{1, \dots, L\}$ 로 표현한다.  $u_i$ ,  $p_{1i}$ 과  $p_{2i}$ 을 tail-biting 터보 부호화된 비트로 표시한다. 부호화된 비트들 ( $u_i$ ,  $p_{1i}$ ,  $p_{2i}$ )은 인터리빙된 후 각 서브스트림으로 나누어져서 변조 및 역 푸리에 변환 (inverse discrete Fourier transform; IDFT) 되어 각각의 MIMO 채널을 통하여 전송된다. 수신단 안테나를 통하여 수신된 신호가 적절한 cyclic prefix 제거와 이산 푸리에 변환 (discrete Fourier transform; DFT)을 통한 후 MMSE (minimum mean square error) 검출기로 입력된다고 가정할 때  $k$  번째 OFDM 부반송파의 수신 신호 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{r}[k] = \mathbf{H}[k]\mathbf{a}[k] + \mathbf{v}[k] \quad \text{for } k=1, \dots, N \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{r}[k] = [r_1[k] r_2[k] \dots r_{M_R}[k]]^T$ ,  $\mathbf{H}[k]$  는  $M_R \times M_T$  크기의 채널 임펄스 응답 매트릭스이다. 또한,  $\mathbf{a}[k] = [a_1[k] a_2[k] \dots a_{M_T}[k]]^T$ 는 전송 심볼 벡터이며  $\mathbf{v}[k]$ 는 평균값 0, 분산값  $\sigma^2$ 을 가지는 독립적인 복소 가우시안 잡음으로  $\mathbf{v}[k] = [v_1[k] v_2[k] \dots v_{M_R}[k]]^T$ 로 표현된다.

MIMO 검출기를 거치게 되면,  $u_i$ 에 대응하는 신호 ( $x_i$ ,  $y_{1i}$ ,  $y_{2i}$ )이 출력되는데 여기서  $x_i$ 은 정보비트이며  $y_{1i}$ 과  $y_{2i}$ 은 각각 RSC1과 RSC2에 해당하는 패리티 비트이다. 그림 1과 같이 MIMO 검출기의 출력 신호들은  $\hat{u}_i$ 을 추정하기 위해 SISO MAP 복호기로 출력되며, 다시 터보 복호기의 soft-output은 MIMO 검출기로 피드백된다.

### III. 제안하는 조기 정지 기법

터보 복호기의  $i$  번째 내부 반복에서  $L_j^{(i)}(\hat{u}_l)$  과  $L_{j_e}^{(i)}(\hat{u}_l)$  을 각각 추정된 정보 비트  $\hat{u}_l$  의 대수 최대우도 (log likelihood ratio; LLR)와 부가 (extrinsic) 정보라고 하자. 또한,  $L_j^{(i)}(\hat{p}_{jl})$  과  $L_{j_e}^{(i)}(\hat{p}_{jl})$  을 MAP 복호기  $j$  ( $j=1, 2$ ) 로부터 전달된 추정된 패리티 비트  $\hat{p}_{jl}$  의 LLR과 부가정보라고 하자. 그러면 다음과 같은 관계식이 주어진다<sup>4)</sup>.

$$L_j^{(i)}(\hat{u}_l) = L_{j_a}^{(i)}(\hat{u}_l) + L_c x_l + L_{j_e}^{(i)}(\hat{u}_l) \quad (2)$$

여기서  $L_{j_a}^{(i)}(\hat{u}_l)$  는  $u_l$  의 사전 (*a priori*) 정보이며  $L_c$  는 채널의 값이다. (2)와 마찬가지로  $L_j^{(i)}(\hat{p}_{jl})$  는 다음과 같이 정의 된다.

$$L_j^{(i)}(\hat{p}_{jl}) = L_{c y_{jl}} + L_{j_e}^{(i)}(\hat{p}_{jl}) \quad (3)$$

$N_{ber}$  을 한 패킷 내에서의 비트 에러 개수라고 정의하면, 수많은 모의실험을 통하여 다음의 관찰 결과들을 얻을 수 있다.

1. 수신된 부호화된 패킷이 해독하기 “양호”한 경우,  $E[|L_{j_a}^{(i)}(\hat{u}_l)|]$  와  $E[|L_{j_e}^{(i)}(\hat{u}_l)|]$  는  $i$  가 증가함에 따라 모두 증가한다.  $N_{ber}$  이 0에 근접할 때,  $E[|L_{j_a}^{(i)}(\hat{u}_l)|]$  와  $E[|L_{j_e}^{(i)}(\hat{u}_l)|]$  는  $E[|L_c x_l|]$  보다 월등히 큰 값을 나타낸다. 따라서  $L_j^{(i)}(\hat{u}_l)$  는 주로  $L_{j_a}^{(i)}(\hat{u}_l) + L_{j_e}^{(i)}(\hat{u}_l)$  에 의해서 결정된다.

2. 수신된 부호화된 패킷이 해독하기에 “불량”한 경우,  $E[|L_{j_a}^{(i)}(\hat{u}_l)|]$  와  $E[|L_{j_e}^{(i)}(\hat{u}_l)|]$  는  $i$  가 증가함에 따라 주목할 만한 증가가 없으며, 따라서  $E[|L_j^{(i)}(\hat{u}_l)|]$  는 주로  $E[|L_c x_l|]$  의 근방이나 혹은 더 낮은 값에 남아있게 된다.

3. 수신된 부호화된 패킷이 해독하기 “양호”한 경우,  $E[|L_{j_e}^{(i)}(\hat{p}_{jl})|]$  는  $i$  가 증가함에 따라 증가한다.  $N_{ber}$  이 0에 근접할 때,  $E[|L_{j_e}^{(i)}(\hat{p}_{jl})|]$  는  $E[|L_{c y_{jl}}|]$  보다 월등히 큰 값을 나타낸다. 따라서  $L_j^{(i)}(\hat{p}_{jl})$  은 주로  $L_{j_e}^{(i)}(\hat{p}_{jl})$  에 의해서 결정된다.

4. 수신된 부호화된 패킷이 해독하기에 “불량”한 경우,  $E[|L_{j_e}^{(i)}(\hat{p}_{jl})|]$  는  $i$  가 증가함에 따라 주목할 만한 증가가 없으며 따라서  $E[|L_j^{(i)}(\hat{p}_{jl})|]$  는 주로  $E[|L_{c y_{jl}}|]$  의 근방이나 혹은 더 낮은 값에 남아있게 된다.

여기서  $E[X]$  는 확률변수  $X$  의 기대값을 나타낸다. 수신된 패킷이 “불량”인 경우에는  $L_j^{(i)}(\hat{u}_l)$  와  $L_j^{(i)}(\hat{p}_{jl})$  는 각각  $L_c x_l$  와  $L_{c y_{jl}}$  의 영향을 많이 받게 된다. 여기서  $L_c x_l$  와  $L_{c y_{jl}}$  에 있는 노이즈 항들은 독립적이다. 따라서 수신된 패킷이 “불량”인 경우에는  $L_j^{(i)}(\hat{u}_l)$  와  $L_j^{(i)}(\hat{p}_{jl})$  이 서로 관련성이 떨어진다. 이를 이용하여 우리는 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. 추정된 패리티 비트들의 값들과 추정된 정보 비트들의 값들이 상호간에 얼마나 관련이 되어 있는지를 관찰함으로써 우리는 수신된 패킷이 “양호”인지 “불량”인지를 결정할 수가 있다. 이와 같은 성질을 이용하여 수신된 패킷의 “양호”와 “불량”을 판단하기 위한 지시자로서 다음과 같이  $D_p$  를 정의 한다.

$$D_p \triangleq \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^2 \hat{p}_{jl} \otimes \tilde{p}_{jl} \quad (4)$$

여기서  $\hat{p}_{jl}$  은 복호된 패리티 비트를 나타내며,  $\tilde{p}_{jl}$  는 복호된 정보 비트들을 재 부호화하여 얻어진 패리티 비트를 나타낸다.  $A \otimes B$  는  $A$  와  $B$  의 배타적 논리합 (exclusive or) 을 나타낸다. 즉,  $D_p$  는 복호된 패리티 비트들과 복호된 정보 비트들로부터 재 부호화하여 얻어진 패리티 비트들간의 부호의 차이값을 나타낸다. 수신된 패킷이 “양호”인 경우,  $i$  가 증가함에 따라  $D_p$  는  $N_{ber}$  과 유사하게 0으로 근접하게

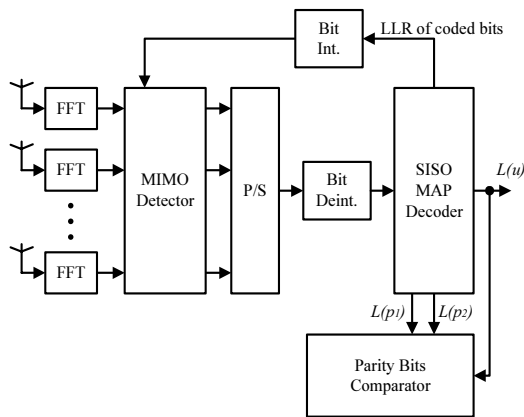


그림 1. 제안된 정지 기법의 수신기 구조  
Fig. 1. Receiver structure of the proposed stopping scheme.

된다. 일반적으로  $N_{ber}$  과  $D_p$  는 거의 동시에 0에 도달한다. 반대로 “불량”인 패킷에 대해서는  $i$ 가 증가함에 따라  $D_p$ 는 매우 높은 값을 유지하게 된다. 따라서,  $D_p$ 는 터보 처리의 반복을 종료하기 위한 지시자로 사용될 수 있다.

이를 요약하여 본 논문에서는 다음과 같은 새로운 정지 기법을 제안한다.

터보 복호의  $i$ 번째 반복에서 MAP1과 MAP2의 패리티 비트들은 MAP2의 복호된 정보 비트들로부터 재 부호화된 패리티 비트들과 비교된다. 패리티 비트들이 서로 일치 ( $D_p$ 가 0에 근접) 하게 되면 반복을 종료한다.

이러한 관찰은 “불량”인 수신 패킷에 대해서는 추정된 정보 비트들과 추정된 패리티 비트들이 관련성이 떨어진다는 직관에서부터 출발했다. 이것은 MAP 복호기가 각각의 부호화된 비트들의 에러 확률을 최소화한다는 관점에서 최적이라는 사실로부터 옳은 가정이다<sup>7)</sup>.

제안된 조기 정지 기법은 터보 복호기의 내부 반복의 정지와 MIMO 검출기의 외부 반복의 정지 모두를 위하여 사용할 수가 있다. 그러나 제안된 조기 정지 기법은 추가의 부호화 과정을 필요로 한다. 따라서 이 방법은 터보 부호를 갖는 터보 처리 MIMO 시스템에 적용하는 경우 정지 기법 수행의 부담을 줄이기 위하여 외부 반복을 정지하는 기법으로 사용되었을 때 더욱 효과적이게 된다. 그 이유는 내부 반복의 종료에 정지 기법을 쓰는 경우 외부가 종료되기 전까지는 내부 반복은 설정된 최대 값까지 동작할 것이기 때문이다. 즉, 외부 반복의 횟수를  $n_{outer}$ , 설정된 내부 반복의 최대값을  $n_{inner\_max}$ , 마지막 외부 반복에서 수행되는 내부 반복의 횟수를  $n_{inner}$  라고 하면 터보 복호기의 총 내부 반복 횟수는  $n_{outer} \times n_{inner\_max} + n_{inner}$ 가 된다. 즉, 내부 반복 마다 조기 정지 기법을 사용하여 검사를 한다고 해도 마지막 외부 반복을 제외한 모든 외부 반복의 경우에 내부 반복은 설정된 최대값 ( $n_{inner\_max}$ ) 까지 동작을 하게 되고 마지막 외부 반복에서만 내부 반복 횟수를 줄이게 된다. 이 때 조기 정지 기법의 동작은 터보 복호기의 총 내부 반복 횟수만큼 수행되게 된다. 이에 반해 외부 반복을 종료하기 위해 조기 정지 기법을 사용할 경우에는 외부 반복 횟수만큼만 조기 정지 기법을 수행하게 된다. 따라서 본 논문에서는 제안된 조기 정지 기법을 그 수행 부담을 줄이기 위하여 MIMO 검출기의

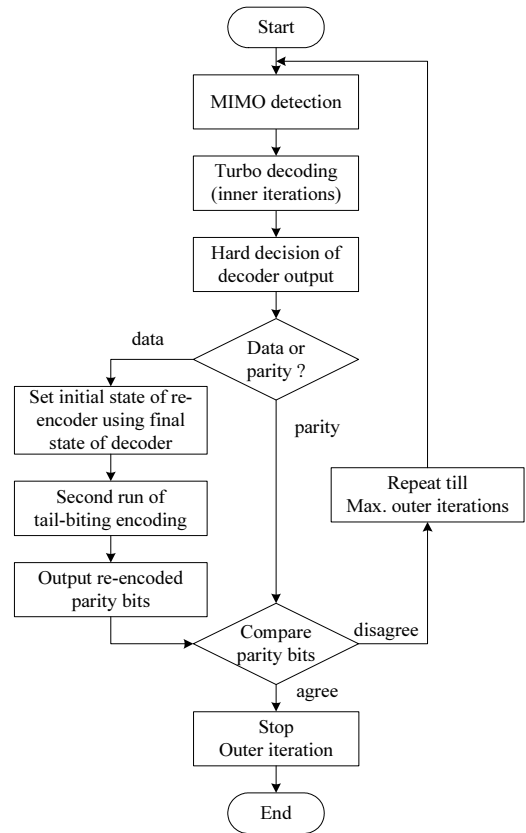


그림 2. 외부 반복을 종료하기 위한 제안된 정지 기법의 플로우 차트  
Fig. 2. Flow chart of the proposed stopping scheme for the outer iteration.

외부 반복을 종료하는데 사용하도록 한다.

이제 우리는 제안된 정지 기법을 IEEE 802.16e 모바일 와이맥스 시스템의 터보 처리에 적용하기 위한 효과적인 방법을 제안한다. 모바일 와이맥스 시스템에서는 tail-biting 부호가 주파수 효율을 증가시키기 위해서 채택되었다. Tail-biting 구조는 두 단계의 부호화 과정을 거쳐야 한다. 즉, 첫 번째 부호화는 all-zero 스테이트에서 동작하며, 두 번째 부호화는 첫 번째 부호화를 수행한 후 이의 결과에 대응하는 스테이트에서 동작한다. 이는 코드 워드의 초기 스테이트를 최종 스테이트와 일치하게 만들기 위함으로 이렇게 함으로써 tail-biting 코드는 tail-bits의 손실을 없애고 zero termination 부호에 비해 시스템의 전송율을 높일 수 있게 된다<sup>8)</sup>. 제안된 정지 기법에서 요구되는 패리티 비트들의 재 부호화 역시 두 단계의 부호화 과정을 필요로 한다. 그러나 패리티 비트의 tail-biting 재 부호화의 부담은

터보 처리를 하는 동안 절반 수준으로 낮출 수 있다. 이것은 터보 복호의 마지막 내부 반복에서 최종 상태를 관찰함으로써 tail-biting 부호기의 초기 상태를 알 수가 있고, 따라서 패러티 비트들의 재 부호화 시 첫 번째 부호화 동작을 건너뛸 수 있기 때문이다. 터보 처리의 외부 반복을 종료하기 위한 제안된 정지 기법의 구조를 그림 2의 플로우 차트를 통하여 요약하여 나타내었다.

#### IV. 실험

본 절에서는 본 논문에서 제안한 정지 기법과 종래의 다양한 정지 기법들을 IEEE 802.16e 모바일 와이맥스 시스템 환경에서 MIMO 시스템의 터보 처리에 적용하여 그 성능을 비교 평가한다. RSC 부호화기는 8진수 (13, 15, 11)의 생성기가 사용되었다. 즉, 피드백 루프를 위한 생성 다항식은  $1 + D + D^3$ 이며, 패러티 비트를 위한 생성 다항식은  $1 + D^2 + D^3$ 과  $1 + D^3$ 이다. 송신과 수신 안테나의 개수는 모두 2로 가정한다. 사용된 채널의 모델은 ITU-R Veh. A (60km/h)이며, 사용된 데이터 버스트의 프로파일은 다음과 같다. FFT 사이즈는 1024, 변조는 QPSK, 1/2의 부호화율을 가지며 각 서브채널이 48개의 서브캐리어를 가지는 5개의 서브 채널을 통하여 전송하는 것으로 가정한다. 각각의 부호화된 전송 패킷은 480개의 정보 비트를 가지며 따라서 480 x 2개의 부호화 비트를 가진다.

터보 처리 MIMO 수신기의 성능은 외부 반복과 내부 반복의 횟수에 따라 달라지게 된다. 외부와 내부의 반복 횟수를 정하는 것은 2차원적인 검색을 필요로 하는 문제이다. 그러나 이것은 외부 반복의 정지를 위하여 조기 정지 기법을 사용하게 되면 내부 반복의 횟수를 정하는 문제로 줄어든다. 정지 기법들이 터보 처리의 외부 반복을 정지하기 위한 수단으로 사용되면 내부 반복 횟수는 미리 설정된 최대값까지 수행된다. 이 때 터보 복호기의 내부 반복 횟수의 최대값은 터보 처리 MIMO 수신기의 패킷 오율 (packet error rate; PER) 성능이 수렴하게 되는 최소의 횟수로 정할 수 있다.

모의실험에서는 정지 기법들을 외부 반복의 종료를 위하여 사용하고 내부 반복은 설정된 횟수만큼 수행되도록 하였다. 즉, 설정된 내부 반복의 마지막 수행이 완료된 직후 SCR, HDA, SDR과 제안된 정지 기법이 동작하도록 하여 외부 반복의 종료 여부를 결정하는데 사용하도록 하였다.

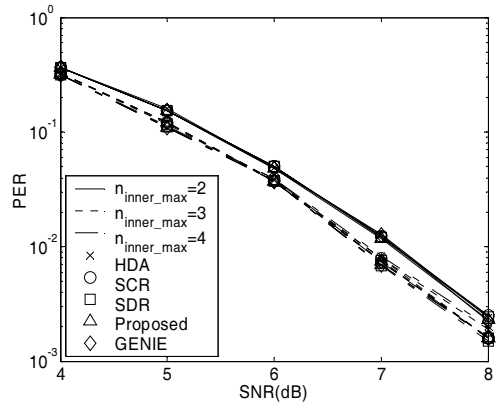


그림 3. 터보 처리 MIMO 시스템에서 내부 반복 횟수에 따른 정지 기법들의 패킷오율 성능 비교  
Fig. 3. PER performance of stopping schemes with different inner iteration numbers for turbo processing MIMO system.

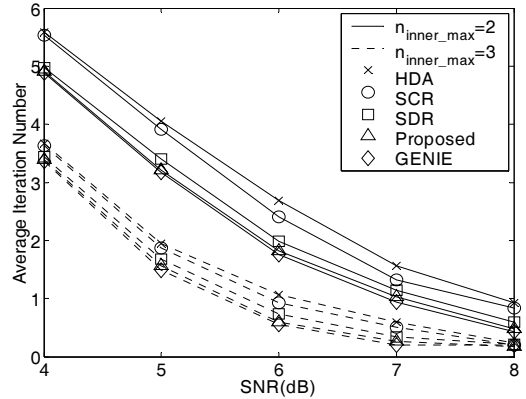


그림 4. 터보 처리 MIMO 시스템에서 내부 반복 횟수에 따른 정지 기법들의 평균 외부 반복 횟수 성능 비교  
Fig. 4. Average number of outer iterations of stopping schemes with different inner iteration numbers for turbo processing MIMO system.

그림 3은 터보 부호를 갖는 터보 처리 MIMO 시스템에서 내부 반복 횟수에 따른 각 정지 기법들의 PER 성능을 보여준다. 그림 3에서 보이는 바와 같이 내부 반복 횟수가 같은 경우 정지 기법들의 PER 성능은 주목할 만한 차이를 보이지 않았다. 다만, 내부 반복의 횟수가 3회 이상이 될 경우 터보 처리 MIMO 수신기의 PER 성능은 더 이상 개선되지 않고 수렴하였다.

그림 4는 터보 처리 MIMO 시스템에서 내부 반복의 횟수에 따른 제안된 정지 기법과 종래의 정지 기법들의 평균 외부 반복 횟수를 보이는 그림이다. 그림 4에서 보이는 바와 같이 내부 반복의 횟수가

증가하면 모든 정지 기법들의 평균 외부 반복의 횟수가 감소하게 된다. 또한, 내부 반복의 횟수가 증가함에 따라 정지 기법들 간의 평균 외부 반복 횟수의 차이가 줄어들게 되나 제안된 정지 기법이 종래의 정지 기법을 외부 반복의 종료율 위해 사용한 것에 비해 더 적은 횟수의 평균 외부 반복을 필요로 함을 알 수 있다. 즉, 내부 반복 횟수를 3으로 고정하였을 때 PER 0.1을 만족하기 위한 Eb/No인 5dB에서 제안한 정지 기법과 GENIE는 약 1.5회의 외부 반복을 필요로 하지만 SDR은 1.7회, SCR과 HDA는 약 2회의 외부 반복을 필요로 하였다. 또한 PER 0.01을 만족하기 위한 Eb/No인 6.8dB에서 제안한 정지 기법과 GENIE는 약 0.3회의 외부 반복을 필요로 하였지만 SDR은 0.5회, SCR과 HDA는 약 0.8회의 외부 반복을 필요로 하였다. 내부 반복의 횟수가 같은 경우 정지 기법들은 그림 3에서와 같이 유사한 PER 성능을 보였지만 이것은 종래의 정지 기법들이 제안한 정지 기법에 비하여 더 큰 값의 평균 외부 반복 횟수를 가지고 얻어진 결과이다. 즉, 그림 4에서 보이는 바와 같이 동일한 평균 외부 반복 횟수에서 비교한다면 제안된 기법은 종래의 정지 기법에 비해 약 0.5~1dB의 Eb/No 성능의 개선을 보였다.

## V. 결론

본 논문에서는 MIMO 시스템의 터보 처리를 위한 새로운 조기 정지 기법이 제안되었으며, IEEE 802.16e 모바일 와이맥스 환경에서 기존의 정지 기법들과 성능 비교가 되었다. 제안된 기법의 성능은 전송된 비트의 오류율과 터보 처리 시스템의 평균 외부 반복 횟수로 평가하였을 때 GENIE와 동일한 성능을 보였다. 제안된 기법은 재 부호화된 페리티 비트의 생성을 위한 추가의 부호화기를 필요로 한다. 그러나 부호화기의 복잡도는 MIMO 검출기의 복잡도에 비해 상대적으로 매우 작으므로 터보 처리의 외부 반복 횟수를 감소시켜 얻을 수 있는 복호의 복잡도 감소는 훨씬 크다. 또한, 제안된 기법은 성능을 희생시키지 않고 터보 처리의 평균 지연 시간을 감소시킬 수 있다. 제안된 기법에서 요구되는 재 부호화의 부담은 모바일 와이맥스에 적용된 tail-biting 부호의 경우 복호 처리 시에 얻을 수 있는 정보를 이용하여 절반으로 줄일 수 있음을 보였다. 제안된 정지 기법은 매 전송 패킷에 CRC가 전송되지 않는 모바일 와이맥스와 같은 시스템에서 터보

처리 MIMO 시스템의 외부 반복의 종료에 적용 시 효율적으로 사용될 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- [1] B. Hochwald and S. Ten Brink, "Achieving Near-Capacity on a Multiple-Antenna Channel", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 3, pp. 389-399, March 2003.
- [2] M. Sellathurai and S. Haykin, "TURBO-BLAST for Wireless Communications: Theory and Experiments", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 10, pp. 2538-2546, Oct. 2002.
- [3] M. Moher, "Decoding via Cross Entropy Minimization", *Proc. IEEE Globecom Conf.*, pp. 809-813, Dec. 1993 (Houston, TX).
- [4] R. Y. Shao, S. Lin, and M.P.C. Fossorier, "Two Simple Stopping Criteria for Turbo Decoding", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 8, pp. 1117-1120, Aug. 1999.
- [5] Y. Wu, B. D. Woerner, and W. J. Ebel, "A simple stopping criterion for turbo decoding", *IEEE Commun. Lett.*, vol.4, no.8, pp.258-260, Aug. 2000.
- [6] IEEE Std 802.16e-2005, *Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems - Amendment 2 for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile operation in Licensed Bands*, Feb., 2006.
- [7] D. Raphaeli and A. Gurevitz, "Investigation into decoding algorithm for turbo codes", *Electro. Lett.*, vol.36, no.9, pp.809-810, April 2000.
- [8] J. B. Anderson and S. M. Hladik, "Tailbiting Map decoders", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 297-302, Feb. 1998.

황 종 윤 (Jong Yoon Hwang)

정회원



1996년 연세대학교 전기전자공학과 석사  
1996년~현재 삼성전자 정보통신 연구소  
2003년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사 과정  
<관심분야> 무선 및 이동 통신, CDMA 및 OFDMA 모델, MIMO

황 금 찬 (Keum-Chan Whang)

정회원



1979년 Polytechnic Institute of New York, Ph.D  
1980년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수  
<관심분야> 무선 및 이동 통신

조 동 균 (Dong-Kyoon Cho)

정회원



2004년 연세대학교 전기전자공학과 박사  
2004년~현재 삼성전자 정보통신 연구소  
<관심분야> 통신공학, 이동 통신 시스템, MIMO