

다중 안테나 시스템에서 Group Shuffled BP 복호를 사용하는 반복 MMSE-SIC 기법

정회원 박 상 준*, 종신회원 최 수 용*

An Iterative MMSE-SIC Scheme with Group Shuffled BP Decoding for MIMO Systems

Sangjoon Park* *Regular Member*, Sooyong Choi* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 다중 안테나 시스템을 위한 Group Shuffled BP 복호를 사용하는 반복 MMSE-SIC 기법을 제안한다. Group Shuffled BP 복호는 부호어를 여러 개의 그룹으로 나누어 순차적인 복호를 하는 기법으로, 제안 기법은 수신된 심볼들을 수신 시간에 따라 여러 그룹으로 나눈 후 각 그룹별로 Group Shuffled BP 복호 및 MMSE-SIC 검출을 순차적으로 진행한다. 이는 모든 비트들의 복호 과정이 진행된 이후 MMSE-SIC 검출을 진행하는 기존의 반복 MMSE-SIC 기법에 비해 보다 빠른 수렴 속도를 보이고, 따라서 제안 기법은 동일한 반복 검출 과정 수를 가질 때 기존 기법보다 우수한 성능을 보인다. 모의실험을 통해 제안 기법이 Standard BP 복호나 Group Shuffled BP 복호 기반의 기존 반복 MMSE-SIC 기법보다 더 낮은 비트 오류율을 달성함을 확인하였다.

Key Words : MIMO, Iterative MMSE-SIC, LDPC codes, Standard BP, Group Shuffled BP

ABSTRACT

In this paper, we propose an iterative minimum mean square error with soft interference cancellation (MMSE-SIC) scheme with group shuffled BP (GSBP) decoding for multiple-in multiple-out (MIMO) systems. GSBP decoding divides codeword into a number of group to process the update procedure in a series. Using the nature of GSBP decoding, the proposed schemes divides received symbols into a number of groups by their reception time, and progresses the decoding process and the MMSE-SIC detection process in a series through the entire groups. This enables the proposed scheme to achieve a faster convergence speed than the conventional MMSE-SIC scheme that progresses the MMSE-SIC detection process after the decoding process of entire coded bits. Consequently, the proposed scheme shows better performance than the conventional scheme if both schemes have the same number of detection iterations. Simulation results verify that the proposed scheme achieves a lower BER than the conventional MMSE-SIC schemes with standard BP decoding or GSBP decoding.

I. 서 론

송·수신단에서 모두 여러 개의 안테나를 사용하는 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 다중 안테

나) 시스템은 시스템의 수율을 크게 향상시키는 대표적인 기법의 하나로 송·수신단에서 하나의 안테나만을 사용하는 SISO (Single-Input Single-Output, 단일 안테나) 시스템에 비해 무선 통신 시스템의 채널 용량

* 연세대학교 전기전자공학과 차세대 통신 연구실 (azssa@yonsei.ac.kr, csyong@yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-09-433, 접수일자 : 2010년 9월 1일, 최종논문접수일자 : 2010년 10월 13일

을 근본적으로 증가시키는 것으로 알려져 있다^[1]. MIMO 시스템에서는 매 전송 시간마다 각 송신 안테나들을 통해 각각 다른 신호들이 전송되므로 MIMO 시스템의 수신기에서는 매 전송 시간마다 각 수신 안테나로 수신된 송신 신호들을 분리·검출해야 한다. 터보 원리^[2]를 이용한 반복 MMSE-SIC (Minimum Mean Square Error Soft Interference Cancellation) 기법은 MMSE-SIC 검출기와 채널 부호의 복호기에서 각 수신 비트들의 사후 정보 (Extrinsic Information)를 계산하고, 이를 다음 반복 검출 과정에서 서로의 사전 정보 (A Priori Information)로 활용함으로써 성능 향상을 도모한다. 이러한 반복 MMSE-SIC 검출기는 최적의 성능을 보이는 연판정 MAP (Maximum A Posteriori) 기반 검출보다 낮은 연산량을 요구하는 준 최적 수신 기법으로 알려져 있다^[3-8]. 특히, [3]에서는 터보 시공간 부호 (Turbo Space-Time Code)가 사용된 MIMO 시스템을 위한 반복 MMSE-SIC 기법들이 제안되었으며, 낮은 복잡도를 지니는 반복 MMSE-SIC 기법들이 [4]에서 제안되었다. 또한, [5]에서는 MIMO-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템을 위한 LDPC 부호^[9]의 설계 및 해당 시스템을 위한 반복 MMSE-SIC 기법을 제안하고 있다.

이러한 반복 MMSE-SIC 기법은 채널 부호의 복호기에서 사후 정보의 계산을 필요로 하므로, 보통 LDPC (Low-Density Parity-Check Code) 부호^[9]와 같은 반복 연판정 복호 (Iterative Soft Decision Decoding) 기법을 사용하는 채널 부호의 사용이 필요하다. LDPC 부호는 일반적으로 BP (Belief Propagation, 신뢰 전달) 방법에 기반을 둔 복호 기법들을 통해 복호되는데, Standard BP 복호가 가장 대표적인 복호 기법으로 알려져 있다. Standard BP 복호는 반복 복호 과정에서 체크 노드들과 비트 노드들의 메시지를 동시에 갱신하는 복호 방법으로 복호 수렴에 많은 수의 반복 복호 과정이 필요하다. 따라서 보다 빠른 복호 수렴을 위해 GSBP (Group Shuffled BP) 복호^[10]가 제안되었다. GSBP 복호는 모든 부호 비트들을 서로 공통된 원소를 갖지 않는 G 개의 그룹으로 나누고, 각 그룹들의 순서에 따라 그룹에 속한 부호 비트들의 메시지를 순차적으로 갱신한다. 이 때 특정 그룹은 자신보다 먼저 복호된 그룹에서 갱신된 정보를 자신의 복호 과정에 활용할 수 있고, G 가 증가할수록 더욱 많은 갱신된 정보들이 다음 그룹의 복호 과정에서 사용된다. $G=1$ 인 경우 모든 부호 비트들의 복호 순서가 동일하므로 이 때 GSBP 복호는

Standard BP 복호와 동일하고, 따라서 $G>1$ 인 GSBP 복호는 Standard BP 복호보다 더욱 빠른 복호 수렴을 가져온다.

본 논문에서는 매 그룹별로 순차적으로 복호 과정을 진행하는 GSBP 복호의 특성을 이용하는 반복 MMSE-SIC 기법을 제안한다. 제안 기법은 한 번의 반복 검출 과정마다 한 번의 반복 복호 과정을 지니며, 이 때 복호 과정에서 수신된 심볼들을 수신 시간에 따라 여러 그룹으로 분리하고 각 그룹별로 GSBP 복호 과정과 MMSE-SIC 검출 과정에 따른 사후 정보의 교환 과정을 순차적으로 진행하여 반복 검출 과정에서 사후 정보가 더욱 자주 갱신되도록 한다. 본 논문의 제안 기법처럼 BP 복호가 적용된 기본적인 반복 MMSE-SIC 기법^[5]에 대한 여러 연구가 진행되었다^[6-8]. [6]에서는 LDPC 부호가 사용된 MIMO 시스템을 위한 반복 MMSE-SIC 기법이 연구되었으나 이는 반복 검출 과정에서의 복잡도 감소에 초점을 맞추었다. [7]에서는 Standard BP 복호 기반 반복 MMSE-SIC 기법의 수렴 속도 개선 방법이 연구되었으나, 이는 많은 수의 반복 검출 및 복호 과정을 필요로 하며 또한 한 번의 반복 검출 과정에서 한 번의 반복 복호 과정을 사용할 경우 기존 MMSE-SIC 기법들^[5-6]과 동일한 성능을 보인다. [8]에서는 LDPC 부호의 체크 노드들을 나누어 반복 복호 과정을 진행하는 반복 MMSE-SIC 기법에 관한 연구가 진행되었으나 이는 본 논문의 제안 기법처럼 검출기와 복호기 간 순차적인 정보 교환은 불가능하다. 제안 기법은 기존^[5-7]의 반복 MMSE-SIC 기법과 비교할 때 보다 증가된 정보 교환 과정 수로 인해 반복 검출 과정에서 Latency가 증가하지만^[10] 또한 증가된 정보 교환 과정 수를 통해 보다 빠른 수렴 속도를 보인다.

II. 시스템 모델

그림 1은 본 논문의 송신단 구조를 나타내고 있다. $D = \{d_1, \dots, d_K\}$ 는 LDPC 부호기에 입력되는 정보 비트열을 나타내며 K 개의 비트를 포함하고 있다. D 는 LDPC 부호기를 거쳐 N 개의 부호 비트를 갖는 $C = \{c_1, \dots, c_N\}$ 로 부호화된다. C 는 다시 변조 과정을 거쳐 M 개의 심볼을 갖는 $S = \{s_1, \dots, s_M\}$ 로 변조되며 이 때 s_i 는 $c_{a(i-1)+1}, \dots, c_{ai}$ 로부터 변조되며 $a=N/M$ 는 변조 레벨을 나타낸다. S 는 $X = \{\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_W\}$ 로 N_T 개의 송신 안테나에서 송신을 위해 공간 분할 다중화 (Spatial Multiplexing) 되며, 이 때

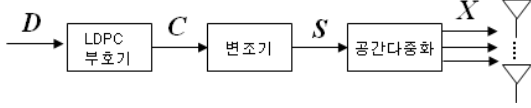


그림 1. 송신단 구조 블록 다이어그램

$W = M/N_T$, $\vec{x}_i = [x_{i,1}, \dots, x_{i,N_T}]^T$ 이며 각 $x_{i,j} = s_{(i-1)N_T+j}$ 이다. 각 $x_{i,j}$ 는 평균 에너지 E 를 가지며 MIMO 채널을 거친 후 N_R 개의 수신 안테나들을 통해 \vec{y}_i 로 수신되는데 이 때 \vec{x}_i 와 \vec{y}_i 간의 입-출력 관계식은 다음과 같다.

$$\vec{y}_i = \mathbf{H}_i \cdot \vec{x}_i + \vec{z}_i \quad (1)$$

식 (1)에서 $\mathbf{H}_i = [\vec{h}_{i,1}, \dots, \vec{h}_{i,N_T}]$ 는 $N_R \times N_T$ 행렬로 송·수신단 사이의 MIMO 채널을 나타내고, \vec{z}_i 는 $N_R \times 1$ 벡터로 \vec{z}_i 의 원소들은 축마다 분산 $\sigma^2 = N_o/2$ 을 갖는 평균이 0인 AWGN(Additive White Gaussian Noise, 가산형 백색 가우시안 잡음)이다.

그림 2는 수신 신호를 검출하기 위한 반복 MMSE-SIC 수신 구조를 나타내고 있다^[6-7]. 그림 2의 수신 구조는 기존 반복 MMSE-SIC 기법들 및 제안 반복 MMSE-SIC 기법에 모두 적용될 수 있다. 각 \vec{y}_i 가 수신된 후 첫 번째 반복 검출 과정에서는 LDPC 복호기에서 생성된 정보가 없으므로 MMSE-SIC 검출기는 선형 MMSE 검출기의 경우와 동일한 사후 LLR (Log-Likelihood Ratio) L_M 을 생성하고, 이를 사전 정보로 이용하여 LDPC 복호기의 사후 LLR L_D 가 계산된다. 두 번째 반복 검출 과정부터는 이전 반복 검출 과정에서 생성된 L_D 가 MMSE-SIC 검출기에 사전 정보로 사용되어 L_M 이 계산되고, 이러한 과정은 반복 검출 과정이 종료될 때까지 반복된다. 이때 MMSE-SIC 검출기에서 \vec{x}_i 중 k 번째 송신 안테나에서 전송된 심볼 $x_{i,k}$ 의 j 번째 비트

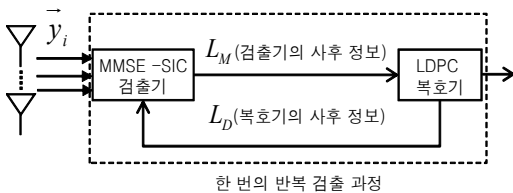


그림 2. 수신단 구조 블록 다이어그램

$c_v(=a((i-1)N_T+k-1)+j)$ 의 사후 LLR $L_M(c_v)$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$L_M(c_v) = \log \frac{P(c_v = +1 | \hat{x}_{i,k})}{P(c_v = -1 | \hat{x}_{i,k})} - L_D(c_v) \quad (2)$$

식 (2)에서 $L_D(c_v)$ 는 LDPC 복호기에서 전달된 MMSE-SIC 검출기의 사전 LLR이며, 첫 번째 반복 검출 과정에서 모든 $L_D(c_v)$ 는 0이다. $\hat{x}_{i,k}$ 는 비트 c_v 를 포함하고 있는 심볼 $x_{i,k}$ 에 대한 MMSE-SIC 검출기의 추정치이며, 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{x}_{i,k} = \left(\left(\frac{N_o}{E} \mathbf{I}_{N_R} + \mathbf{H}_i \Delta_{i,k} \mathbf{H}_i^H \right)^{-1} \vec{h}_{i,k} \right)^T \vec{y}_{i,k} \quad (3)$$

식 (3)의 \mathbf{I}_{N_R} 은 $N_R \times N_R$ 항등 행렬이며, $\vec{y}_{i,k}$ 는 \vec{y}_i 에서 다른 N_T-1 개의 수신 심볼에 대한 연관성 제거가 이루어진 신호를 나타낸다. $\vec{y}_{i,k}$ 는 다음 식 (4)를 통해 계산된다.

$$\vec{y}_{i,k} = \vec{y}_i - \sum_{m=1, m \neq k}^{N_T} \overline{x_{i,m}} \cdot \vec{h}_{i,m} \quad (4)$$

식 (4)의 $\overline{x_{i,m}}$ 은 사전 정보에 기반을 둔 심볼의 평균을 나타낸다. 집합 A 를 해당 변조 레벨에서 생성 가능한 모든 복소 심볼을 원소로 갖는 집합이라고 정의할 때, $\overline{x_{i,m}}$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\overline{x_{i,m}} = \sum_{x \in A} x P(x_{i,m} = x) \quad (5)$$

식 (3)에서 $\Delta_{i,k}$ 는 공분산 행렬을 나타내며, 다음과 같이 나타난다.

$$\Delta_{i,k} = \text{diag} \left[\frac{\sigma_{x_{i,1}}^2}{E}, \dots, \frac{\sigma_{x_{i,k-1}}^2}{E}, 1, \frac{\sigma_{x_{i,k+1}}^2}{E}, \dots, \frac{\sigma_{x_{i,N_T}}^2}{E} \right] \quad (6)$$

위 식에서 $\sigma_{x_{i,q}}^2$ 는 $x_{i,k}$ 와 같이 전송된 \vec{x}_i 에서 q 번째 송신 안테나를 통해 전송된 심볼에 대한 분산이며, 식 (7)을 통해 계산할 수 있다.

$$\sigma_{x_{i,q}}^2 = \sum_{x \in A} |x - \overline{x_{i,q}}|^2 P(x_{i,q} = x) \quad (7)$$

III. 제안 반복 MMSE-SIC 기법

기존^[5-7]의 반복 MMSE-SIC 기법은 송신된 모든 부호 비트의 L_M 이 계산된 이후 이를 사전 정보로 사용하여 채널 부호의 복호기에서 모든 부호 비트의 L_D 를 계산하고, 이를 다시 MMSE-SIC 검출기에서 L_M 의 사전 정보로 사용하는 과정을 반복한다. 즉, 모든 수신 심볼에 대한 MMSE-SIC 검출 과정 후 모든 수신 비트에 대한 채널 부호의 복호기의 복호 과정이 반복되는 구조를 지니고 있는데, 이러한 기존 기법은 채널 부호의 복호기와 MMSE-SIC 검출기 사이에서 사후 정보의 교환이 모든 심볼/비트들이 복호/검출된 이후에 이루어지므로 효율적인 정보 교환이 이루어지지 못하는 단점을 지닌다.

본 논문에서는 이에 GSBP 복호 기법을 활용한 효율적인 반복 MMSE-SIC 기법을 제안한다. 제안 기법은 각 부호 비트들을 순서대로 동일한 수의 원소를 갖는 G 개의 그룹 $\Omega_1, \dots, \Omega_G$ 으로 나눈다. 이 때 W/G 가 정수가 되도록 G 를 정하여 서로 다른 그룹의 비트들이 서로 다른 수신 시간을 가지도록 하며, 따라서 최대 가능한 G 는 W 가 된다. 제안 기법은 먼저 $1 \leq i \leq W$ 인 모든 y_i 가 도착한 이후 모든 부호 비트의 L_M 를 계산한다. 계산된 L_M 를 이용하여, $g=1$ 로 놓고 $v \in \Omega_g$ 인 $L_D(c_v)$ 를 계산하고 이를 사전 정보로 이용하여 $L_M(c_v)$ 를 계산한다. 이러한 과정을 $g=G$ 가 될 때까지 반복하여 한 번의 반복 검출 과정을 마친다.

제안 기법에서는 한 번의 반복 검출 과정마다 LDPC 복호기와 MMSE-SIC 간 사후 정보가 여러 번에 나누어 갱신이 이루어지며, 이 때 G 가 클수록 한 번의 반복 검출 과정마다 더욱 많은 사후 정보가 갱신된다. 따라서 제안 기법은 MMSE-SIC 검출기와 LDPC 복호기 간 모든 사후 정보를 한 번에 교환하는 기존 반복 MMSE-SIC 기법보다 더욱 빠른 수렴 속도를 보인다.

그림 3은 각각 기존 기법과 제안 기법에 대한 예제를 보여주고 있다. 예제에서 $M=N=4$, $G=W=2$ 이다. 기존 반복 MMSE-SIC 기법의 경우 이전 반복 검출 과정에서 계산된 L_M 들을 사전 정보로 사용하여 모든 L_D 들이 갱신되고, 갱신된 L_D 들이 사전 정보로 사용되어 모든 L_M 들을 갱신하며 한 번의 반복 검출

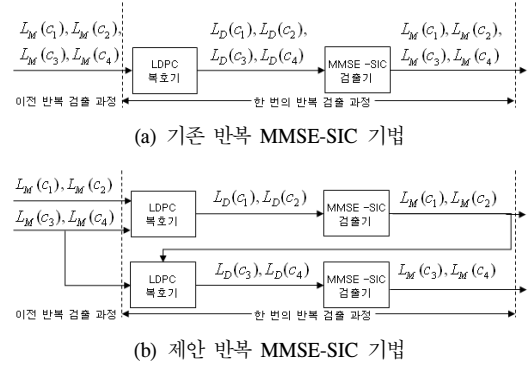


그림 3. 기존 반복 MMSE-SIC 기법과 제안 반복 MMSE-SIC 기법에서 사후 정보 교환 과정 예제

과정을 마친다. 한편 제안 기법에서는 먼저 Ω_1 에 속한 비트들에 대한 LDPC 복호기에서의 사후 정보인 $L_D(c_1), L_D(c_2)$ 가 갱신되고, 이들을 사전 정보로 이용하여 $L_M(c_1), L_M(c_2)$ 가 갱신된다. 갱신된 $L_M(c_1), L_M(c_2)$ 와 이전 반복 검출 과정에서 계산된 $L_M(c_3), L_M(c_4)$ 를 사전 정보로 사용하여 Ω_2 에 속한 비트들의 LDPC 복호기에서의 사후 정보 $L_D(c_3), L_D(c_4)$ 가 갱신되고, 이들을 사전 정보로 이용하여 $L_M(c_3), L_M(c_4)$ 를 갱신하며 한 번의 반복 검출 과정을 마친다.

제안 기법은 수신된 심볼들을 수신 시간에 따라 여러 그룹으로 나눈 후 각 그룹별로 GSBP 복호 및 MMSE-SIC 검출 과정을 순차적으로 진행한다. 따라서 제안 기법에서는 그룹 수가 증가할수록 반복 검출 과정에서의 Latency가 증가하게 된다. 하지만 제안 기법에서 더욱 큰 성능 향상을 얻기 위해 무조건 G 를 증가시킬 필요는 없으며, 어느 정도 이상의 G 를 가지는 제안 기법은 최대 가능한 $G(=W)$ 를 가지는 제안 기법의 성능에 근접하는 성능을 보일 수 있다. 이러한 사실은 모의실험 결과를 통해 또한 확인할 수 있다.

제안 기법은 LDPC 복호기와 MMSE-SIC 검출기 간 순차적인 정보 교환을 진행하므로 한 번의 반복 검출 과정에서 각 그룹별 GSBP 복호 이후 MMSE-SIC 검출 과정이 진행된다. 따라서 제안 기법의 마지막 반복 검출 과정에서는 GSBP 복호기와 MMSE-SIC 검출기 간 순차적인 정보 교환을 하지 않고 이전 검출 과정에서 생성된 L_M 을 통한 GSBP 복호 과정만을 진행한다. GSBP 복호 기법은 Standard BP 복호 기법과 동일한 복잡도를 지니므로^[10], 이 때 제안 기법은 Standard BP 복호 및 GSBP 복호 기반의 기존 반복 MMSE-SIC 기법들과 동일한 복잡도를 가진다.

IV. 모의실험 결과

제안 반복 MMSE-SIC 기법의 성능을 알아보기 위해 본 논문에서는 $N_T = N_R = 2$ 인 MIMO 시스템을 고려하였다. $K = 4608$, $N = 13824$ 이며 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조가 사용되었다. 부호율 1/3의 LDPC 부호가 고려되었으며, LDPC 부호의 비트 노드들과 체크 노드들의 차수 분포 (Degree Distribution)는 각각 $\lambda(x) = 0.38889x + 0.20370x^2 + 0.40741x^{11}$, $\rho(x) = 0.92593x^4 + 0.07407x^5$ 이다. 실험 채널로 독립적 레일리 감쇄 (Independent Rayleigh Fading) 채널이 고려되었으며, $M = 6912$, $W = 3456$ 이다. 본 논문에서는 Standard BP 복호 또는 GSBP 복호 기반의 기존 반복 MMSE-SIC 기법^[5-7], 그리고 제안 반복 MMSE-SIC 기법 등 총 세 가지 기법에 대해 모의실험을 진행하였다.

그림 4는 그룹 수에 따른 제안 반복 MMSE-SIC 기법의 BER (Bit Error Ratio, 비트 오류율)에 대한 모의실험 결과를 나타내고 있으며, $G = 3456 (= W)$ 인 경우는 제안 기법이 최대 그룹 수를 가지는 경우를 나타낸다. 그림 4에서 제안 기법은 반복 검출 과정 수에 상관없이 $G = 3456$ 인 경우에서 가장 낮은 BER을 달성하지만, $G = 16$ 인 경우에도 거의 동일한 성능을 보임을 확인할 수 있다. 제안 기법에서 G 의 증가는 Latency의 증가로 이어지므로^[10], $G \geq 16$ 일 경우 $G = 3456$ 인 경우에 비해 보다 작은 Latency를 가지면서 그에 근접하는 성능을 얻을 수 있음을 그림 4를 통해 확인할 수 있다.

그림 5는 그룹 수에 따른 GSBP 복호 기반의 반복 MMSE-SIC 기법의 성능을 나타내고 있는데, 그림 4

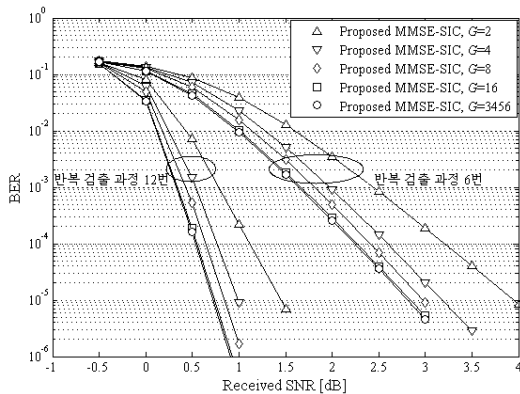


그림 4. 제안 반복 MMSE-SIC 기법의 G 에 따른 BER 성능 비교

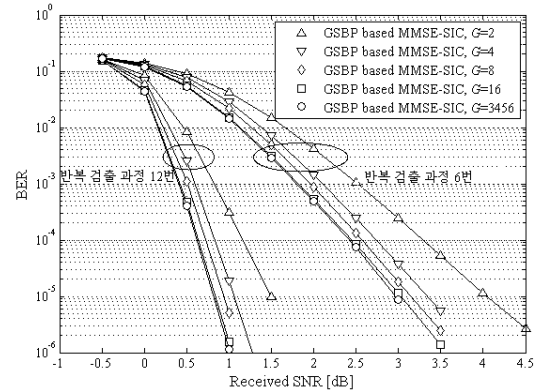


그림 5. GSBP 복호 기반 반복 MMSE-SIC 기법의 G 에 따른 BER 성능 비교

에 나타난 제안 기법의 경우와 마찬가지로 반복 검출 과정 수에 상관없이 $G = 3456$ 인 경우에서 가장 낮은 BER을 달성하지만 $G = 16$ 인 경우에도 거의 동일한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

그림 6과 7은 반복 검출 과정 수가 각각 6번, 12번 일 때 각 기법들의 BER을 비교하고 있다. $G = 2$ 인 경우는 제안 기법 및 GSBP 복호 기반 기존 기법에서 최소 Latency를 가지는 경우를 의미하며, $G = 16$ 인 경우는 그림 4와 그림 5의 결과들을 통해 얻어진 $G = W$ 인 경우의 성능에 근접하는 성능을 얻을 수 있는 경우들 중 최소 Latency를 가지는 경우를 의미한다. 반복 검출 과정 수가 6번일 때, 10^{-5} 의 BER을 기준으로 제안 기법은 Standard BP 복호 기반 기존 기법과 비교하여 $G = 2, 16$ 일 경우 각각 약 1.0 dB 및 약 2.1 dB의 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 이득을 얻고, 동일한 G 를 가지는 GSBP 복호 기반 기존 기법과 비교하여 각각 약 0.2 dB 및 0.1 dB의 SNR 이득을 얻는다. 반복 검출 과정 수가 12일 때, 제안 기법은

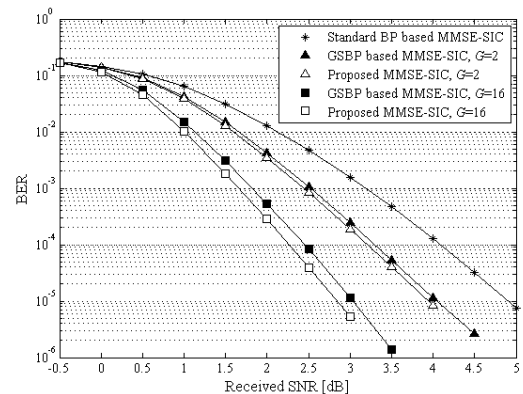


그림 6. 반복 검출 과정 수가 6번일 때 BER 성능 비교

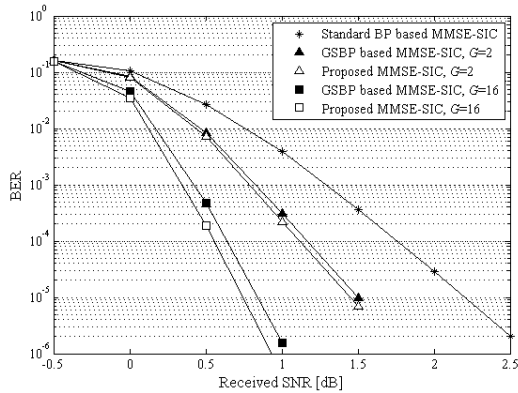
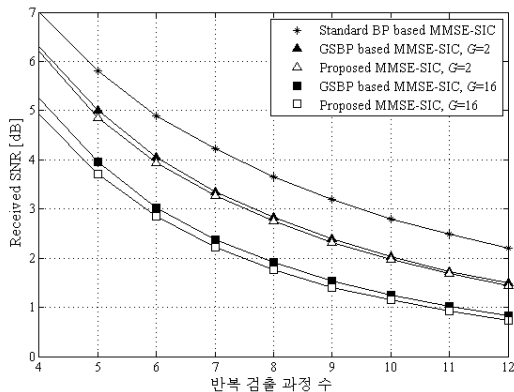


그림 7. 반복 검출 과정 수가 12번일 때 BER 성능 비교

Standard BP 복호 기반 기존 기법과 비교하여 $G=2$, 16일 경우 약 0.8 dB 및 약 1.5 dB의 SNR 이득을 얻고, 동일한 G 를 가지는 GSBP 복호 기반 기존 기법과 비교하여 약 0.05 dB 및 약 0.1 dB의 SNR 이득을 얻는다.

그림 8은 반복 검출 과정 수마다 10^{-5} 의 BER을 달성하기 위해 필요한 수신 SNR을 비교하고 있다. 그림 8을 통해 제안 기법은 동일한 반복 검출 과정 수를 가지는 기존 기법들보다 항상 낮은 수신 SNR을 요구하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 적은 반복 검출 과정 수를 가질 때 더욱 큰 성능 향상을 이룸을 확인할 수 있다. 이는 제안 기법이 기존 기법들보다 보다 빠른 수렴 속도를 가지는 것을 나타내며, 또한 G 가 증가함에 따라 제안 기법이 기존 기법들보다 보다 빠른 복호 수렴을 이룰 수 있음을 의미한다. 동일한 G 를 가지는 GSBP 복호 기반 기존 기법과 비교할 때, 제안 기법은 $G=2$ 인 경우 반복 검출 과정 수가 5번일 때 가장 큰 약 0.15 dB의 SNR 이득을 얻으며 $G=16$ 인 경우 반

그림 8. BER 10^{-5} 을 달성하기 위한 반복 검출 과정 수 별 수신 SNR 비교

복 검출 과정 수가 4번일 때 가장 큰 약 0.3 dB의 SNR 이득을 얻는다. Standard BP 복호 기반 기존 기법과 비교할 때, 제안 기법은 $G=2$ 인 경우 반복 검출 과정 수가 5번일 때 가장 큰 약 1.0 dB의 SNR 이득을 얻으며 $G=16$ 인 경우 반복 검출 과정 수가 4번일 때 가장 큰 약 2.2 dB의 SNR 이득을 얻는다.

V. 결 론

본 논문에서는 MIMO 시스템을 위한 GSBP 복호를 사용하는 반복 MMSE-SIC 기법을 제안하였다. 제안 기법은 한 번의 반복 검출 과정마다 기존의 반복 MMSE-SIC 기법보다 사후 정보의 갱신을 더욱 자주 이루어지게 하며 이를 통해 보다 빠른 수렴 속도를 보인다. 모의실험을 통해 제안 반복 MMSE-SIC 기법이 동일한 반복 검출 과정 수를 갖는 Standard BP 복호 및 GSBP 복호 기반 기존 반복 MMSE-SIC 기법들보다 우수한 성능을 보이고 보다 빠른 수렴 속도를 가지는 것을 확인하였다. 모의실험 결과를 통해 또한 제안 기법이 특히 적은 반복 검출 과정 수를 가지거나 큰 G 를 가질 때 Standard BP 복호 및 GSBP 복호 기반의 기존 반복 MMSE-SIC 기법들보다 더욱 우수한 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *An Introduction to Space-Time Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2003.
- [2] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 44, No.10, pp.1261-1271, Oct. 1996.
- [3] E. Biglieri, A. Nardio, and G. Taricco, "MIMO doubly-iterative receivers: pre- vs. post-cancellation filtering," *IEEE Commun. Letters*, Vol.9, No.02, pp.106-108, Feb. 2005.
- [4] D. Liu and M. Fitz, "Low complexity affine MMSE detector for iterative detection-decoding MIMO OFDM systems," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.56, No.01, pp.150-158, Jan. 2008.
- [5] B. Lu, G. Yue, and X. Wang, "Performance analysis and design optimization of LDPC-coded MIMO OFDM systems," *IEEE*

Trans. Signal Processing, Vol.52, No.02, pp. 348-361, Feb. 2004.

- [6] A. Matache, C. Jones, and R. Wesel, "Reduced complexity MIMO detectors for LDPC coded systems," *Proc. IEEE Military Communications Conf.*, pp.1073-1079, Oct. 2004.
- [7] S. Gounai and T. Ohtsuki, "Mapping for iterative MMSE-SIC with belief propagation," *Proc. IEEE International Conf. on Commun.*, pp.4885-4890, June 2007.
- [8] J. Hu, H. Zhang, and Y. Yang, "Efficient LDPC-based, threaded layered space-time-frequency system with iterative receiver," *Etri Journal*, Vol.30, No.06, pp.807-817, Dec. 2008.
- [9] D. MacKay, "Good error-correcting codes based on very sparse matrices," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.45, No.02, pp.399-431, March 1999.
- [10] J. Zhang and M. Fossorier, "Shuffled iterative decoding," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.53, No. 02, pp.209-213, Feb. 2005.

최 수 용 (Sooyong Choi)

종신회원



1995년 8월 연세대학교 전자공학과

1997년 8월 연세대학교 전자공학과 석사

2001년 8월 연세대학교 전자공학과 박사

2002년 3월~2004년 8월 University of California, San Diego, Postgraduate Researcher

2004년 9월~2005년 7월 Oklahoma State University, Research Assistant Professor and Researcher

2005년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학과 조교수
<관심분야> Interference management/coordination /cancellation/mitigation, Detection and estimation, Iterative receivers, 무선 통신 시스템, cognitive radios

박 상 준 (Sangjoon Park)

정회원



2004년 8월 연세대학교 전기전자공학부 졸업

2006년 2월 연세대학교 전기전자공학부 석사

2006년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<관심분야> 이동 통신 시스템,

오류 정정 부호, Hybrid ARQ, 다중 안테나 시스템, 차량 통신