

논문 2012-50-5-1

다중 안테나 반복 수신 시스템에서의 적응형 반복 결정 방법에 관한 연구

(Adaptive Iteration Schemes for Iterative Receivers in MIMO Systems)

노 지 환*, 권 동 승**, 이 충 용***

(Jeehwan Noh, Dongseung Kwon, and Chungyong Lee[©])

요 약

본 연구에서는 다중 안테나 시스템 기반 반복 수신기의 동작 원리를 이해하고 연산량을 줄이기 위한 연구를 진행하였다. 기존의 반복 수신기는 고정된 횟수의 반복 수신을 하는 것에 비하여, 적응형 반복 결정 방법은 프레임의 상태에 따라 반복 횟수를 조절함으로써 수신기에서의 불필요한 동작을 제한하여 연산량을 절감시킬 수 있다. 모의실험 결과를 통하여, 제안된 기법 시스템의 에러 성능은 유지시키면서 수신기의 평균 반복 횟수를 크게 감소시키는 것을 확인하였다.

Abstract

We consider some adaptive iteration schemes that provide lower complexity of the iterative receiver by reducing unnecessary iterations. While conventional iterative receiver considers only fixed number of iterations, we apply adaptive iteration schemes, taking into account quality of the received frame. Based on simulation results, proposed schemes reduce average number of iterations while maintaining BER performance compared to the conventional scheme.

Keywords: 반복 수신 시스템, 적응형 반복 결정 방법, cyclic redundancy check (CRC), log-likelihood ratio (LLR)

I. 서 론

다중 안테나 통신 시스템은 여러 개의 송신 안테나와 수신 안테나에 의한 공간 분할을 이용하여 무선 채널 링크의 신뢰도를 향상시킨다. 또한 송신 안테나를 통해 독립적인 신호를 전송함으로써 향상된 전송률을 보장하는 장점을 가지고 있다. 차세대 무선통신 기술은 빠른

데이터 전송률과 높은 수신 신뢰도를 요구한다. 따라서 이와 같은 요구를 만족시킬 수 있는 다중 안테나를 이용한 고성능·고효율 시스템에 관련한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

높은 전송률을 요구하는 현재의 통신 환경에서 수신 데이터의 신뢰도를 높이기 위한 한 방법으로 길쌈 부호(convolutional code)와 연계된 터보 반복 복호(turbo iterative decoding)^[1] 기법이 연구되었다. 또한 이러한 기법과 다중 안테나 검출 기술이 더해진 다중 안테나 반복 수신 시스템이 제안되었다^[2]. 다중 안테나 통신 시스템은 독립적인 데이터를 한꺼번에 전송할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 이를 수신하는 방법에 있어서의 간섭 문제가 발생하게 된다. 이러한 간섭 문제를 해결하고 높은 데이터 전송률을 보장받기 위하여 뛰어난 성

* 학생회원, *** 정회원, 연세대학교 전기전자공학부
(Department of Electrical and Electronic
Engineering, Yonsei University)

** 정회원, 한국전자통신연구원
(Electronics and Telecommunications Research
Institute)

© Corresponding Author(E-mail: E-mail: cylee@yonsei.ac.kr)
접수일자 2013년6월13일, 수정완료일 2013년4월18일

능을 가지는 수신기의 필요성이 대두되고 있다. 반복 수신기의 경우 수신 과정이 복잡한 단점에도 불구하고 시스템의 여러 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 장점을 가지기 때문에 많은 주목을 받고 있다. 따라서 반복 수신기를 통신 시스템에 구현하기 위하여 연산량을 줄이면서 기존의 고성능을 유지시킬 수 있는 방법에 관한 연구가 필요하다.

터보 반복 복호 분야에서, cyclic redundancy check(CRC)와^[3] 연계하여 복호된 프레임의 여러 유무 여부를 판별함으로써 복호 반복 횟수를 제한하는 연구 결과가 진행되었다^[4-5]. 본 논문에서는 이러한 원리를 반복 수신 시스템에 도입하여 수신기에서의 반복 결정에 적용하고 반복 횟수 절감 효과를 확인하였다. 또한, 프레임의 신뢰도를 나타내는 파라미터를 유도해내기 위하여 프레임 내 각 비트의 여러 확률과 log-likelihood ratio(LLR)의 관계를 정리하고, 그 관계로부터 반복 수신기의 성능에 영향을 미치지 않으면서 수신기에서의 반복 횟수를 줄이는 기법을 제안하였다. 다음으로, 반복 횟수가 증가해도 프레임 내의 비트들의 변동이 없으면 해당 프레임의 성능이 수렴했을 확률이 매우 높다는 관찰로부터, 이전 반복 프레임과의 비트 변동량을 측정하여 변화가 없을 시 반복 진행을 멈추는 방법을 제안하였다.

II. 시스템 모델

본 장에서는 다중 안테나 시스템에 적합한 반복 수신기의 구조에 대하여 살펴보고 이와 관련한 시스템 모델에 대하여 알아보기로 한다. 그림 1은 다중 안테나 기반 반복 수신 시스템의 전체적인 송수신 구조를 나타낸 것이고, 여기서 송·수신 안테나의 수는 각각 , 로 정의한다. 그림 1에서 데이터 벡터 \mathbf{b} 는 채널 부호기와 인터리버를 거쳐 다음과 같은 코드 벡터 \mathbf{c} 가 된다.

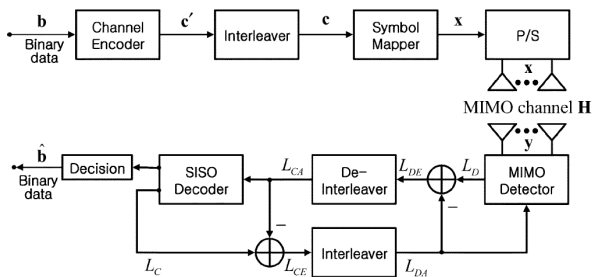


그림 1. 반복 수신을 위한 다중 안테나 송수신 시스템
Fig. 1. MIMO system for iterative detection.

$$\mathbf{c} = [\mathbf{c}_1^T, \dots, \mathbf{c}_i^T, \dots, \mathbf{c}_{n_T}^T]^T, \quad (1)$$

여기서 서브 벡터 $\mathbf{c}_i = [c_{i,1}, \dots, c_{i,\beta}]^T$ 는 M-ary QAM 심볼 x_i 로 변조되고 $\beta = \log_2 M$ 이다. 결국 송신기에서 심볼 벡터 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_{n_T}]^T$ 가 전송되어 채널을 통과하게 된다. 여기서 채널 $\mathbf{H} \in C^{n_R \times n_T}$ 의 각 성분은 평균 0, 분산 $1/n_T$ 의 정규 분포를 따른다고 가정한다. 채널을 거쳐 노이즈가 더해진 수신 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

여기서 노이즈 벡터 \mathbf{n} 은 0의 평균과 σ_n^2 의 분산을 가진다. 각 심볼 x_i 의 에너지를 σ_x^2 라고 하면, 안테나 별 평균 수신 SNR은 $\rho = \sigma_x^2 / \sigma_n^2$ 가 된다.

그림 1의 수신기 구조에서, multiple-input multiple-output(MIMO) 검출기는 수신 벡터 \mathbf{y} , 채널 행렬 \mathbf{H} , 이전 반복 수신으로부터의 *a priori* LLR (L_{DA})을 이용하여 *a posteriori* LLR(L_D)을 계산한다^[6]. L_D 로부터 L_{DA} 를 제거한 extrinsic LLR(L_{DE})는 디인터리버를 거친 후 soft-input soft-output(SISO) 채널 복호기의 입력인 *a priori* LLR(L_{CA})이 된다. 채널 복호기의 출력은 MIMO 검출기로 피드백 되어 다음 반복 수신 시 *a priori* LLR(L_{DA})로 사용된다. 이러한 과정을 통하여 수신기에서의 1회의 반복 수신이 완료되고 이는 지정된 반복 횟수에 도달할 때까지 계속 되풀이된다.

반복 수신기 구조에서 최적의 검출 방식은 *a posteriori* probability(APP) 기준을 기반으로 한 maximum *a posteriori*(MAP) 방식의 검출기이다. 본 논문에서는 MAP 검출 방식을 반복 수신기의 MIMO 검출기에 적용하기로 한다. $c_{i,j}$ 를 서브 벡터 \mathbf{c}_i 내의 j 번째 비트라 하면, MIMO 검출기에서 $c_{i,j}$ 에 대응하는 *a posteriori* LLR은 다음과 같다.

$$L_D(c_{i,j}|\mathbf{y}) = \ln \frac{P(c_{i,j} = +1|\mathbf{y})}{P(c_{i,j} = -1|\mathbf{y})} \quad (3)$$

베이즈의 정리(Bayes' theorem)를 이용하면 식 (3)은 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$L_D(c_{i,j}|\mathbf{y}) = \ln \frac{P(c_{i,j} = +1)}{P(c_{i,j} = -1)} + \ln \frac{P(\mathbf{y}|c_{i,j} = +1)}{P(\mathbf{y}|c_{i,j} = -1)}, \quad (4)$$

여기서 앞부분은 검출기의 *a priori* LLR인 L_{DA} 를 의미하고, 뒷부분은 extrinsic LLR인 L_{DE} 를 나타낸다.

III. 적응형 반복 결정 방법

반복 수신기는 수신 성능을 매우 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있지만 반복 수신 횟수에 비례하여 수신기의 연산량이 증가하는 문제점을 보이고 있다. III장에서는 반복 수신 횟수를 절감하기 위한 적응형 반복 결정 방법에 대하여 알아본다.

일반적인 반복 수신기에서 수신 프레임의 성능 향상에 있어서의 경향은 반복이 진행될수록 에러 성능이 좋아지다가 수렴하는 경우가 대부분이다. MIMO 채널의 이득이나 수신 SNR이 안 좋을 경우, 반복을 진행해도 수신 프레임의 성능 향상이 일어나지 않는 경우가 있다. 또한, 수신 프레임 내의 비트 에러를 모두 수정하였을 경우에는 더 이상 반복 수신을 할 필요가 없다. 따라서 이후부터는 반복이 진행되어도 성능 향상이 일어나지 않거나 반복 수신이 필요 없는 프레임을 찾아내는 방법에 대하여 알아보기로 한다.

먼저, CRC를 반복 수신 시스템에 적용하여 에러가 없는 프레임의 불필요한 반복 수신을 줄이는 방안에 대하여 살펴보겠다. 서론에서 언급했듯이, 터보 채널 코딩 분야에서 CRC와 연계하여 복호 과정에서의 반복 횟수를 절감시키는 연구가 진행되었다^[4-5]. 본 논문에서는 이러한 CRC의 에러 검출 성능을 반복 수신기에 적용함으로써 수신기에서의 반복 횟수 절감 효과를 확인해보도록 한다. 그리고 부가적인 CRC가 없이 수신 프레임의 신뢰도를 추정하여 반복 수신을 결정하는 방법을 제안한다. 이와 관련하여 터보 복호 과정에서 프레임 내 LLR 값들의 평균치를 이용하여 신뢰도의 척도로 이용하는 기존의 연구결과가 존재한다^[7]. 본 논문에서는 각 비트의 LLR과 에러 확률의 관계를 설정하고, 이를 활용하여 프레임의 신뢰도를 판단하는 방안을 제시한다. 또한, 이전 회차의 반복 수신 프레임과의 비트 변동량을 측정하여 반복 수신을 조절하는 기법을 제안한다.

1. CRC 기반의 반복 결정 방법

CRC는 현재의 통신 시스템에서 매우 널리 사용되고 있는 에러 검출 기법으로, 동작 원리는 다음과 같다. 먼저, 송신기에서 생성 다항식(generator polynomial)으로부터 만들어진 검사합(checksum)이 데이터 프레임과 결합하여 CRC 코드워드가 만들어진다. 수신기에서는

CRC 검사 과정을 통해 복호된 데이터의 검사합과 실제 수신된 검사합을 비교하여 수신 프레임의 에러 유무 여부를 판별한다.

이후부터는 반복 수신기의 연산량을 줄이기 위하여 CRC를 반복 수신 기법과 연계시키는 방법에 대하여 알아보겠다. 먼저, 송신기에서는 검사합을 데이터 벡터 \mathbf{b} 와 결합시킨다. 데이터 벡터 \mathbf{b} 의 길이를 N 이라 하고, 생성 다항식 $g(x)$ 가 \mathbf{b} 를 이용하여 m 비트 길이의 검사합을 만들어낸다고 하자. 그러면 길이 $N+m$ 의 CRC 코드워드 \mathbf{c}_{CRC} 는 채널 부호기를 통하여 부호화된다. 이후로 기존의 반복 수신기와 동일한 과정을 거친 후, 그림 1 수신기의 결정(decision) 블록 출력으로부터 추정된 CRC 코드워드 $\hat{\mathbf{c}}_{CRC}$ 를 (5)과 같이 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{c}}_{CRC}(x) = x^m \hat{\mathbf{b}}(x) + \hat{\mathbf{r}}(x), \quad (5)$$

여기서 x^m 은 m 비트 시프트 연산을 의미한다. CRC 검사 과정은 결정 블록으로부터 추정된 검사합 $\hat{\mathbf{r}}(x)$ 와 다음과 같이 계산된 $\tilde{\mathbf{r}}(x)$ 가 일치하는지 확인하는 것이다.

$$\tilde{\mathbf{r}}(x) = x^m \hat{\mathbf{b}}(x) \bmod g(x), \quad (6)$$

만일 $\hat{\mathbf{r}}(x)$ 와 $\tilde{\mathbf{r}}(x)$ 가 동일하면, 추정된 CRC 코드워드에 에러가 없다고 판단할 수 있다. 반면에 $\hat{\mathbf{r}}(x)$ 와 $\tilde{\mathbf{r}}(x)$ 가 동일하지 않으면, $\hat{\mathbf{c}}_{CRC}$ 에 에러가 포함되어 있는 것으로 간주한다. CRC 기반의 반복 결정 방법에서 CRC 검사 결과는 반복 수신을 계속 진행할 것인지의 여부를 결정하는데 쓰인다. 만일 CRC 검사가 성공하면, 수신기는 반복 수신을 멈추고 $\hat{\mathbf{c}}_{CRC}$ 에서 검사합 $\hat{\mathbf{r}}$ 을 제거한 $\hat{\mathbf{b}}$ 를 최종 데이터로 사용한다. 반면에 CRC 검사가 실패하면, 수신기는 다음 회차의 반복 수신 단계로 넘어가게 된다.

2. 신뢰도 기반의 반복 결정 방법

2절에서는 CRC 검사합과 같은 추가 정보를 붙이지 않으면서 적응형 반복 결정을 하는 방법에 대하여 알아본다. 제안하는 신뢰도 기반의 반복 결정 방법을 통하여, 기존 반복 수신기의 에러 성능은 유지하면서 불필요한 반복 횟수를 줄이는 효과를 확인하도록 한다.

가. 최소 LLR을 이용하는 기법

그림 1의 SISO 복호기 출력에서 b_j 에 해당하는 a

posteriori LLR은 다음과 같다.

$$\hat{L}_C(b_j) = \ln \frac{P(b_j = 0 | \text{decoding})}{P(b_j = 1 | \text{decoding})}, \quad (7)$$

\hat{L}_C 를 이용하여 \hat{b}_j 는 다음과 같이 결정된다.

$$\hat{b}_j = \begin{cases} 0, & \hat{L}_C(b_j) > 0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

추정된 데이터 벡터 $\hat{\mathbf{b}}$ 는 실제 데이터 벡터 \mathbf{b} 와 에러 벡터 \mathbf{e} 로 나눌 수 있다. 만일 \mathbf{e} 의 j 번째 비트가 1이면, \hat{b}_j 는 잘못 결정된 비트라고 간주할 수 있다. $\hat{L}_C(b_j)$ 의 절대값을 $\gamma_j = |\hat{L}_C(b_j)|$ 라고 정의하면, \hat{b}_j 가 올바르게 결정될 확률은 다음과 같다.

$$P(\hat{b}_j = b_j) = P(e_j = 0) = \frac{e^{\gamma_j}}{1 + e^{\gamma_j}} = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh\left(\frac{\gamma_j}{2}\right) \right], \quad (9)$$

식 (9)에서, 확률값은 γ_j 에 따라 0.5에서 1 사이의 단조 증가 함수임을 확인할 수 있다. 따라서 (9)의 관계를 이용하여 γ_j 를 \hat{b}_j 의 신뢰도 지표로 활용하기로 한다. 만일 프레임 내의 모든 비트에 대하여 $P(e_j = 0)$ 가 1이면, 추정된 데이터 벡터 $\hat{\mathbf{b}}$ 에 에러가 없다는 확률적 결론을 내릴 수 있다. 이러한 경우, 추가적인 반복 수신은 연산량만을 증가시키는 결과를 초래할 것이다.

식 (9)로부터, 각 \hat{b}_j 의 에러 확률은 γ_j 에 연관되어 있는 것을 확인하였다. 다음으로 더욱 효율적으로 프레임 전체의 성능을 관찰하기 위하여 다음과 같이 가장 작은 γ_j 값을 사용하기로 한다.

$$\gamma_{\min} = \min_{1 \leq j \leq N} \gamma_j = \min_{1 \leq j \leq N} |\hat{L}_C(b_j)| \quad (10)$$

γ_{\min} 에 해당하는 식 (9)의 확률값을 P_{\min} 이라 하자. P_{\min} 이 1인 경우, 확률적으로 프레임 내에 에러가 없다고 간주할 수 있기 때문에 반복 수신을 중단하는 것이 효율적이다. 만일 반복 수신을 중단하는 기준점을 완화시키면 수신기에서의 평균적 반복 수신 횟수를 더욱 절감시킬 수 있을 것이다. 예를 들어, 중단 기준점을 0.9 이상으로 잡는다면 ($P_{\min} \geq 0.9$), 평균적으로 기준보다 더 이른 시점에 반복 수신이 중단될 것이다. 이와 같은 기준점 완화 개념을 효율적으로 적용하면, 반복 수신기의 연산량을 더욱 절감시킬 수 있을 것이다. 하지만 기준이 완화될수록 시스템의 에러 성능 측면에서 손해를 볼 수 있기 때문에, 연산량과 에러 성능 사이의

균형을 고려하여 적절한 완화 기준점을 세워야 한다.

나. XOR sum을 이용하는 기법

프레임 단위로 진행되는 반복 수신 과정에서, 반복이 진행될수록 에러 비트들이 수정되면서 프레임의 신뢰도는 점차 향상된다. 이후에 에러가 모두 수정되거나 프레임의 성능이 수렴하면 반복 수신이 진행되어도 프레임의 비트들은 변동이 없을 것으로 예상할 수 있다. 반대로 생각해보면 반복이 증가해도 프레임 내의 비트들의 변동이 없으면 해당 프레임의 성능이 수렴했을 확률이 매우 높을 것이라는 판단을 내릴 수 있다. 수신 프레임의 상태에 따라서 반복 결정을 능동적으로 수행하기 위한 방법으로, 이전 반복 프레임과의 비트 변동량을 측정하여 변화가 없으면 반복 수신 진행을 멈추도록 하는 방법을 제안한다. 그림 1에서 i 번째 반복 수신에서의 결정 출력 벡터를 $\hat{\mathbf{b}}^{(i)}$ 라고 하자. 각 반복 별 $\hat{\mathbf{b}}^{(i)}$ 의 비트 변동량을 관찰하기 위하여 다음의 파라미터를 정의한다.

$$d^{(i)} = \sum_{j=1}^N \hat{b}_j^{(i)} \oplus \hat{b}_j^{(i-1)} \quad (11)$$

식 (11)에서 $d^{(i)}$ 는 (i)번째 반복 수신 프레임과 ($i-1$)번째 반복 수신 프레임의 비트 변동량을 나타내고, \oplus 는 XOR 비트 연산을 나타낸다. $\hat{\mathbf{b}}^{(i)}$ 의 길이를 N 이라고 할 때, 프레임의 각 인덱스 별로 이전 반복 비트와의 XOR 연산을 통하여 변동 유무를 체크하고 프레임 내의 모든 인덱스에 대하여 합치면 이전 프레임과 비교한 변동 유무를 확인할 수 있다. 결과적으로, $d^{(i)}$ 가 0이면 프레임 내의 모든 비트가 변동이 없다고 판단할 수 있

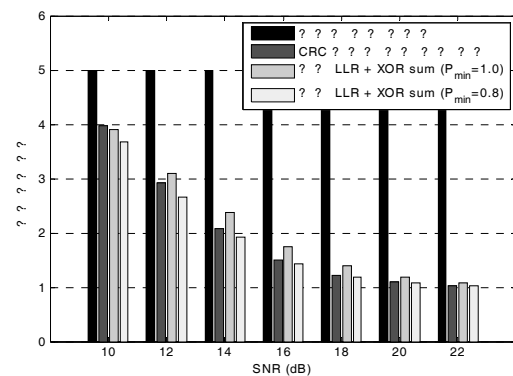


그림 2. 제안된 기법의 평균 반복 횟수

Fig. 2. Average number of iterations of the proposed schemes.

게 된다. 이러한 경우 해당 프레임의 성능이 수렴했다고 판단하고 반복을 더 이상 진행하지 않기로 한다.

IV. 실험 결과

모의실험 결과에서는 기존의 반복 수신기와 제안하는 기법들을 평균 반복 횟수와 에러 성능 측면에서 비교하고 분석한다. 본 실험에서는 1/2 비율의 (7, 5) 생성기를 사용하는 길쌈 부호를 적용하였고, 16-QAM 변조방식이 사용되었다. 데이터 벡터 \mathbf{b} 에 CRC 부호가 적용되는 경우에는 데이터 프레임에 CRC 검사합이 추가되기 때문에, 기존의 기법과 데이터 비율을 맞추기 위하여 천공 길쌈 부호를^[8] 사용하였다. 수신기에서는 MAP 알고리즘이 검출 기법으로 사용되었고, 최대 반복 횟수는 5번으로 제한하였다. 데이터 벡터 \mathbf{b} 의 길이 N 은 1432이고, 송수신 안테나의 수는 2개 ($n_T = n_R = 2$)이다. CRC 부호 적용 시에는 다음의 생성 다항식을 사용하여 16비트 검사합을 사용하였다.

$$g(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1 \quad (12)$$

그림 2는 기존의 반복 수신기, CRC 기반의 반복 결정 방법, 신뢰도 기반의 반복 결정 방법의 수신기 평균 반복 횟수를 나타낸다. 신뢰도 기반의 반복 결정 방법에서는 최소 LLR을 이용하는 기법과 XOR sum을 이용하는 기법을 모두 적용하였다. 또한 기준점의 변화에 따른 성능 차이를 확인하기 위하여 P_{\min} 이 1일 경우와 0.8일 경우를 비교하였다. 그림에서 기존의 반복 수신기는 SNR에 상관없이 고정된 반복 횟수를 보이는 반면에, 적응형 반복 결정 방법을 적용하면 SNR이 높아질

수록 평균 반복 횟수가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. P_{\min} 이 0.8인 경우에는 반복 수신 중단 기준점이 완화되었기 때문에, 다른 기법들에 비하여 가장 작은 평균 반복 횟수를 가지게 된다.

그림 3은 본 논문에서의 기법들을 프레임 에러 확률(FER) 측면에서 비교한 것이다. 제안된 기법들이 평균 반복 횟수 측면에서는 큰 절감 효과를 보이는 반면에, 에러 성능 측면에서는 기존의 반복 수신기와 비슷한 성능을 나타내고 있다. P_{\min} 이 1인 경우는 확률적으로 프레임 내에 에러가 없는 경우에만 반복 수신을 중단하기 때문에, 기존의 반복 수신기와 비교했을 때 성능의 열화가 전혀 없는 것을 확인할 수 있다. 반면에 P_{\min} 이 0.8인 경우에는 반복 수신 중단 기준점 완화로 인한 에러 성능 손실을 보이고 있다. CRC 기반의 반복 결정 방법이 기존의 반복 수신기에 비해 약간의 성능 손실을 보이는 이유는 천공 길쌈 부호의 적용함으로 인하여 부호율이 높아졌기 때문으로 분석할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 다중 안테나 시스템 기반 반복 수신기의 동작 원리를 이해하고 그것의 연산량을 줄이기 위한 연구를 진행하였다. 일정한 프레임 단위로 반복 수신이 진행되는 다중 안테나 기반의 반복 수신기에서는 채널이나 SNR 환경에 따라 수신 프레임에 에러 비트가 존재하지 않거나 지정된 반복 횟수에 도달하기 전에 성능이 수렴하는 경우가 존재한다. 이러한 경우들의 반복 횟수를 줄임으로써 반복 수신 과정에서의 연산량을 감소시키는 방법에 대하여 알아보았다. 모의실험 결과를 통하여 제안한 기법이 기존의 반복 수신기보다 에러 성능은 유지시키면서 평균 반복 횟수를 획기적으로 절감하는 효과를 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] H. Vikalo, B. Hassibi, and T. Kailath, "Iterative Decoding for MIMO Channels via Modified Sphere Decoding," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 3, no. 6, pp. 2299-2311, Nov. 2004.

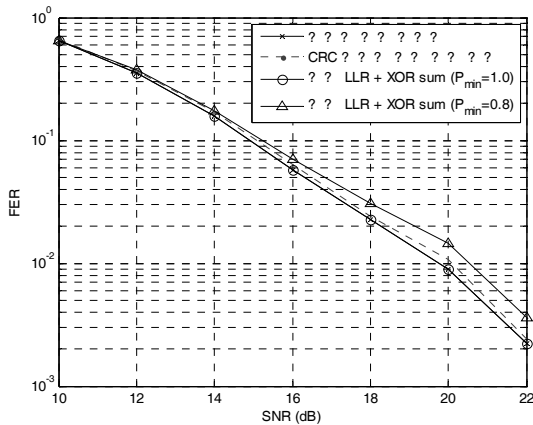


그림 3. 제안된 기법의 FER 성능
Fig. 3. FER performance of the proposed schemes.

- [3] W. W. Peterson and D. T. Brown, "Cyclic codes for error detection," Proceedings of the IRE, pp. 228-235, Jan. 1961.
- [4] A. Shibutani, H. Suda, and F. Adachi, "Reducing average number of turbo decoding iterations," Electron. Lett., vol. 35, no. 9, pp. 701-702, Apr. 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] M. Sellathurai and S. Haykin, "TURBO-BLAST for wireless communications: Theory and experiments," IEEE Trans. Signal Process., vol. 50, no. 10, pp. 2538-2546, Oct. 2002.
- [7] I. Land and P. A. Hoeher, "Using the Mean Reliability as a Design and Stopping Criterion for Turbo Codes," IEEE Information Theory Workshop (ITW), pp. 27-29, Sept. 2001.
- [8] J. Hagenauer, "Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications," IEEE Trans. Commun., vol. 36, no. 4, pp. 389-400, Apr. 1988.

 저 자 소 개



노 지 환(학생회원)
 2007년 연세대학교 전기전자공학부 학사 졸업.
 2009년 연세대학교 전기전자공학부 석사 졸업.
 2009년~연세대학교 전기전자공학부 박사과정.

<주관심분야 : 통신신호처리, 다중사용자 MIMO 시스템>

이 충 용(정회원)

대한전자공학회논문지

48권 TC편 제4호 2011년 참조



권 동 승(정회원)
 1985년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1987년 연세대학교 전자공학과 석사 졸업.
 2004년 연세대학교 전자공학과 박사 졸업.

1988년~현재 한국전자통신연구원 무선액세스시스템연구부장

<주관심분야 : 4세대 이동통신, 스마트 무선집속 기술, 와이브로 시스템 기술>