

다중 안테나 시스템에서의 간섭제거 HARQ 기법

변일무, 상영진, 고병훈, 김광순
연세대학교 전기전자공학부

{[dlfan](mailto:dlfan@yonsei.ac.kr), [yjmich](mailto:yjmich@yonsei.ac.kr), [letsko21](mailto:letsko21@yonsei.ac.kr), [kskim](mailto:kskim@yonsei.ac.kr)}@dcl.yonsei.ac.kr.

Interference Cancellation Hybrid ARQ scheme for MIMO systems

Ilmu Byun, Young Jin Sang, Byung Hoon Ko, Kwang Soon Kim
Dept. of Electrical and Electronic Engineering
Yonsei University 134 Shinchonedong, Sudaemoon-gu Seoul, 120-749, Korea

Abstract

본 논문에서는 다중안테나시스템을 위한 새로운 HARQ (hybrid automatic repeat request) 기법을 제안한다. 일반적으로, HARQ 기법에서는 재전송을 통해 다이버시티 (diversity) 이득을 얻는다. 그러나 재전송하는 동안 채널이 일정한 저속 페이딩 (slow fading) 채널 환경에서는 재전송을 통해 다이버시티 이득을 얻을 수가 없다. 그러므로 기존의 HARQ 전송 방식으로 저속 페이딩 환경에서 다이버시티 이득을 증가시키기 위해 시공간 부호 (space-time coding) 를 사용하는 기법이 제안되었다. 본 논문에서는 송수신 안테나의 개수가 4 개인 4x4 다중안테나 시스템에서 저속 채널 환경에서는 간섭제거를 통해서 고속 채널환경에서는 다이버시티 이득을 통해서 성능을 향상시킬 수 있는 간섭제거 HARQ (Interfere cancellation HARQ) 기법을 제안한다. 모의 실험을 통해 저속 채널환경과 속도가 낮은 Jake's Doppler 채널 모형에서 기존의 기법보다 뛰어난 성능을 갖는 것을 보였다.

I. 서론

무선 통신시스템에서 보다 높은 전송률과 신뢰도를 갖는 통신시스템에 관한 요구가 증가하고 있고, 이에 따라 시변 다중경로 페이딩 채널 (time-varying multi-path fading) 에서 신뢰도와 채널 용량을 증가시키기 위한 연구가 많이 이루어져 왔다. 이러한 연구 중의 하나로 다중 안테나 시스템이 제안되었다 [1]-[3]. 다중 안테나 시스템을 사용하여 채널의 용량을 증가시키고, 통신의 신뢰도를 향상시킬 수 있지만 보다 높은 신뢰도를 갖는 통신이 필요하다.

패킷 통신 시스템에서 ARQ (automatic repeat request) 기법을 사용함으로써 매우 낮은 에러율을 갖는 통신을 보장 할 수 있다. 보다 효율적인 통신을 위하여, 오류정정부호와 결합된 HARQ (hybrid ARQ) 기법에 관한 연구가 진행되고 있다. IR (incremental redundancy) 기법은 재전송시에 추가적인 채널코드의 패리티 비트와 같은 리던던시 (redundancy) 를 보내는 기법이다 [4][5]. 수신단에서는 추가적으로 수신한 신호를 정보 비트를 포함한 패킷과 같이 복조를 함으로써 높은 부호이득을 얻는 기법이다. 하지만 IR 은 정보 비트를 포함한 패킷이 심하게 손상을 입게 되면 재전송을 반복해서 수행해도 본래의 신호를 복원할수 없는 단점이 있다. 체이스 결합 (Chase combining) 기법은 본래의 패킷과 같은 정보를 갖는 패킷을 재전송하는 기법이다 [6]. 이 기법에서는 재전송을 통해 수신 다이버시티를 증가시키는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 하지만 재전송하는 동안 채널이 일정한 저속 채널 (slow fading) 환경에서는, 재전송을 통한 다이버시티를 충분히 얻지못하는 문제점이 있다.

[7]에서는 저속채널에서 재전송을 통한 다이버시티 이득을 얻기 위해 매 재전송 심볼마다 단위 행렬 (unitary matrix) 을 곱하는 BH (basis hopping) 기법을 제안하였고 ZF (zero forcing) 과 MMSE (minimum mean square error) 에 적합한 패킷 결합 기법을 제안하였다. [8][9]에서는 2x2 상황에서 Alamouti 전송기법을 바탕으로 새로운 HARQ

전송 기법을 제안하였다. 홀수 번째 전송에서는 Alamouti 부호의 첫 번째 열에 해당하는 심볼들을 전송하고, 짝수 번째 전송에서는 Alamouti 부호의 두 번째 열에 해당하는 심볼을 전송한다. 그러므로 수신단에서 홀수번째 심볼과 짝수번째 심볼을 사용하여 Alamouti 부호에서와 같은 이득을 얻을 수 있다. 하지만 이 기법은 2x2 다중안테나 시스템에서만 사용할 수 있는 단점이 있다. [10]에서는 4x4 다중안테나 시스템을 위한 HARQ 기법으로 BH 기법과 Alamouti 기반 HARQ 기법을 접목해 재전송을 통해 다이버시티 이득을 얻는 재전송 방식을 제안한다. 본 논문에서는 4x4 다중안테나 시스템에서 재전송을 통해 저속채널에서는 간섭제거를 효과를 얻고, 고속채널에서는 다이버시티 이득을 통해 보다 성능을 향상시킨 간섭제거 HARQ 기법을 제안한다. 모의 실험은 저속 채널, 고속 채널, 그리고 Jake's Doppler 채널에서 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서 HARQ MIMO 시스템 모형을 살펴본다. 3 장에서는 기존의 HARQ 기법을 재검토하고 새로운 HARQ 기법을 제안한다. 4 장에서는 제안한 기법의 성능을 저속채널, 고속 채널, ITU-R 채널에서 모의 실험을 통해 분석한다. 마지막으로 5 장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모형

수신단은 채널 정보를 완벽히 알고, 송신단은 ACK/NACK 정보만 아는 채널 환경을 가정한다. 송신안테나의 개수는 N_t 개 수신안테나의 개수는 N_r 인 다중 안테나 시스템을 가정한다. 다중안테나 채널 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 는 각 원소가 독립이고 균일분포를 갖는 정규 확률 변수로 평균은 0 이고 분산은 1 을 갖는다. i 번째 재전송에서의 수신신호는 다음과 같이 표현할 수 있다. $\mathbf{r}_i \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 은 다음과 같이 나타난다.

$$\mathbf{r}_i = \sqrt{\frac{E_s}{N_i}} \mathbf{H}_i \mathbf{V}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{n}_i, \quad i=1, \dots, N. \quad (1)$$

$\mathbf{s}_i \in \mathbb{C}^{N_i \times 1}$ 는 송신하는 심볼이고 $\mathbf{n}_i \in \mathbb{C}^{N_i \times 1}$ 은 잡음으로 각 원소가 평균은 0 이고 분산은 1 을 갖는 각각 독립이고 균일분포를 갖는 정규 확률 변수이다. E_s 는 심볼 에너지이고 각 안테나 별로 균일하게 나누어진다. N 은 최대 재전송 횟수이고, \mathbf{V}_i 는 재전송시 성능이득을 얻기 위한 단위 행렬이다. 또한 각 재전송마다 잡음 벡터는 독립이라고 가정한다. 채널 행렬은 재전송시마다 같거나 또는 다를 수 있다. 저속 채널환경에서는 채널이 최대 재전송 횟수동안 변하지 않는 경우를 가정한다. 고속 채널환경은 매 재전송마다 채널이 독립적으로 변하는 것을 가정한다.

본 보고서에서는 [7]에서 제안한 재전송된 신호들을 간섭억제 (interference suppression) 을 하기 전에 결합하는 전결합 (pre-combining) 기법을 사용한다. $\mathbf{x}_i = \mathbf{V}_i^H \mathbf{H}_i^H \mathbf{r}_i$ 이고 $\mathbf{C}_i = \mathbf{V}_i^H \mathbf{H}_i^H \mathbf{H}_i \mathbf{V}_i$ 라고 하면 전결합기법은 식(2)와 같다.

$$\mathbf{z}_i = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{C}_i \right)^{-1} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i. \quad (2)$$

\mathbf{z}_i 는 n 번 전송한 경우의 간섭 억제 기법을 사용한 누적된 통계 벡터이다.

III. HARQ 전송기법

다음과 같은 기법들이 저속 채널환경에서 성능을 향상시키기 위하여 설계되었다.

1. BH 기법

BH 기법은 저속 채널 환경에서 다이버시티를 증가시키기 위한 기법이다 [7]. 단위 행렬 다른 형태의 \mathbf{V}_i 를 매 전송마다 곱함으로써, 수신단에서의 채널을 $\mathbf{H}_i \mathbf{V}_i$ 로 변화시킨다. 이러한 특징으로 인해서 수신단에서 저속채널상황에서도 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

2. Alamouti 기반 기법

Alamouti 기반 기법은 송수신안테나의 개수가 2 개인 경우에 적용 가능한 기법으로, 홀수 번째 전송에서는 Alamouti 부호의 첫 번째 열의 형태를 갖도록 $\mathbf{s}_{odd} = [s_1 \ s_2]^T$ 의 형태로 전송하고, 짝수 번째 전송에서는 두 번째 열의 형태를 갖도록 $\mathbf{s}_{even} = [-s_2^* \ s_1^*]^T$ 의 형태로 전송한다. 짝수 번째 수신신호에 켈레신호로 바꾼 뒤 전결합기법을 사용한다. 짝수 번째의 수신신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{r}_{2i}^* = \mathbf{H}^* \mathbf{V}_{2i}^* \mathbf{s}_{2i-1} + \mathbf{n}_{2i}, \quad i=1, \dots, N/2, \quad (3)$$

여기서 \mathbf{V}_{2i}^* 는 다음과 같다.

$$\mathbf{V}_{2i}^* = \mathbf{V}_{2i} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

식 (3)의 수신 신호를 식 (2)의 결합기법을 사용하여 그 전 신호와 결합함으로써 Alamouti 부호와 같이 다이버시티이득과 부호이득을 얻을 수 있다.

3. Alamouti 기반 + BH 기법

앞선 Alamouti 기반 기법은 송수신 안테나의 경우가 2 개인 경우에 대하여 제안된 기법으로 송수신안테나의 개수가 4 개인 경우는 적용할 수 없다. 송수신 안테나의 개수가 4 개인 경우에 대하여 Alamouti 기반 기법에 BH 기법을 사용한 전송기법이 제안되었다 [10]. 이 기법에서는 홀수 번째 전송시에는 전송 심볼을 $\mathbf{s}_{odd} = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4]^T$ 과 같이 구성하여 전송하고, 짝수 번째에는 심볼을 $\mathbf{s}_{even} = [-s_2^* \ s_1^* \ -s_4^* \ s_3^*]^T$ 과 같이 구성하여 전송한다. 또한 여기에 단위 행렬 $\mathbf{V}_{IDX(i)}$ 를 다음 식 (5)와 같이 선택한 뒤, 이를 전송심볼에 곱하여 재전송한다. $\mathbf{V}_{IDX(i)}$ 는 BH 기법과 같이 재전송에 의한 시간 다이버시티를 얻을 수 있도록 다음과 같이 구성되어 있다.

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{V}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{V}_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$IDX(i) = \text{mod} \left(\left\lfloor \frac{i-1}{2} \right\rfloor, 7 \right) \quad (5)$$

4. 제안하는 간섭제거 HARQ 기법

앞선 기법에서는 저속채널에서 다이버시티 이득을 얻기 위해 단위행렬 \mathbf{V} 를 BH기법을 이용하여 설계하였으나, N_i 개의 송신안테나를 갖는 다중안테나 환경에서 재전송을 통해서 얻을 수 있는 송신 다이버시티는 N_i 이므로, HARQ 기법에서 N_i 번의 재전송 이후에는 재전송을 통해 얻는 송신 다이버시티는 작을 것으로 예상할 수 있다. 또한 저속 채널에서는 재전송하는 동안 채널이 변화하지 않으므로, 단위 행렬 \mathbf{V} 를 재전송을 통해 앞의 신호와 간섭이 제거되도록 설계함으로써 성능향상을 꾀할 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제안하는 기법에서의 단위행렬 \mathbf{V} 는 재전송을 통해 송신 다이버시티를 얻기 위한 N_i 개의 단위행렬 \mathbf{V} 와 간섭제거를 수행하기 위한 N_i 개의 단위행렬 \mathbf{V} 로 구성한다. 이러한 단위행렬의 구성은 4x4 다중안테나 시스템 뿐만 아니라, N_i 개의 다중 안테나 시스템에 대하여 적용할 수 있다. 제안하는 4x4다중안테나 시스템에서의 간섭제거 HARQ기법은 홀수 번째 전송시에는 전송 심볼을 $\mathbf{s}_{odd} = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4]^T$ 과 같이 전송하고, 짝수 번째에는 $\mathbf{s}_{even} = [-s_2^* \ s_1^* \ -s_4^* \ s_3^*]^T$ 과 같이 구성하여 전

송한다. 전송시 단위행렬 $\mathbf{V}_{IDX(i)}$ 을 다음과 같이 구성하여 전송한다.

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_3 = \mathbf{V}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{V}_5 = \mathbf{V}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_7 = \mathbf{V}_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$IDX(i) = \text{mod}(i, 8) \quad (6)$$

전결합 기법을 사용하기 위하여, 짝수번째의 수신신호는 식 (3)과 같이 켈레신호로 바꾼다. 단위 행렬 \mathbf{V}_i 를 식 (10)과 같이 설계함으로써 저속채널에서 첫 번째, 두번째 송신 심볼은 각각 세번째, 네번째 송신 심볼과 간섭제거효과를 얻게 된다. 또한 다섯번째, 여섯번째 송신 심볼은 각각 일곱번째와 여덟번째의 송신 심볼과 간섭효과를 얻는다. 고속채널에서는 각 전송마다 채널이 변화하고 \mathbf{V} 는 단위행렬이므로 \mathbf{V} 에 의한 영향 없이 재전송에 의한 다이버시티 이득을 기존 기법들과 같이 얻을 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의 실험은 송수신안테나가 4 개인 상황에서 저속 채널, 고속 채널 그리고 Jake's Doppler 스펙트럼을 갖는 단일 경로 채널상황에서 수행하였다. 저속 채널환경은 재전송 하는 동안 채널이 변하지 않고 일정한 경우를 가정하였고, 고속 채널은 재전송마다 채널이 독립적으로 변하는 환경을 가정하였다. Jake's Doppler 채널은 이동체의 속도가 30km/h 인 경우에 모의실험을 수행하였다. 변조 기법으로는 QPSK 를 사용하였고, ZF 수신기법을 사용하였다. 그림에서 \mathbf{V} 는 [10]에서 제안한 HARQ 기법을 뜻하고 IC 는 논문에서 제안한 간섭제거 HARQ 기법을 뜻한다. 최대 재전송 횟수가 3,4,6,8 인 경우에 대하여 모의 실험을 수행하였다.

그림 1 은 저속 채널에서의 성능을 나타낸다. 각 재전송 경우에서 모두 제안한 기법이 보다 좋은 성능을 나타내는 것을 알 수 있었다. 그림 2 는 고속채널에서의 성능을 나타낸다. 고속 채널에서는 제안한 기법의 간섭제거 이득이 없어지지만 대신 다이버시티 이득을 얻기 때문에 기존의 기법과 동일한 성능을 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 3 은 이동체의 속도가 30km/h 인 경우의 Jake's Doppler 채널에서의 성능을 나타낸 그림이다. 이 경우는 재전송에 따라 채널이 조금씩 달라지는 경우로 앞선 저속 채널과 고속 채널의 중간 형태이다. 이 경우에도 제안한 기법이 간섭제거 효과와 다이버시티 이득을 얻음으로써 기존의 기법보다 좋은 성능을 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 그러므로 제안하는 기법이 고속 채널환경에서 기존의 기법과 비슷한 성능을 갖다가 저속 채널 환경으로 갈수록 기존의 기법보다 뛰어난 성능을 갖는 것을 확인 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 4x4 다중안테나 시스템에서의 간섭제거 HARQ 기법을 제안하였다. 재전송하는 동안에 채널이 일

정한 환경에서는 재전송을 통해 간섭제거를 함으로써 성능 이득을 얻는 것을 확인 할 수 있었다. 이와 반대로 고속 채널 환경에서는 성능의 열화없이 고속 채널에 의한 다이버시티 이득을 얻는 것을 알 수 있었다. 그러므로 제안하는 간섭제거 HARQ 기법이 시간에 따른 채널의 변화가 작을수록 기존의 기법보다 뛰어난 성능을 갖는 것을 확인 할 수 있었다.

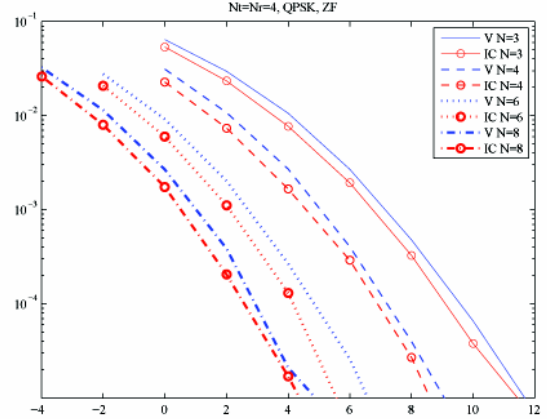


그림 1 저속 채널에서의 간섭제거 HARQ 기법 (IC) 과 기존 기법 (V) 간의 성능 비교

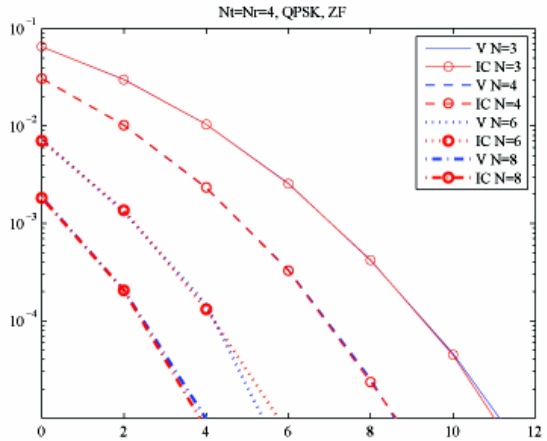


그림 2 고속 채널에서의 간섭제거 HARQ 기법 (IC) 과 기존 기법 (V) 간의 성능 비교

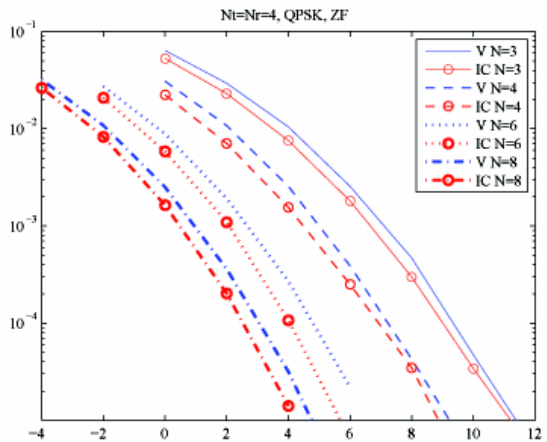


그림 3 이동체의 속도가 30km/h인 Jake's Doppler 채널에서의 간섭제거 HARQ 기법 (IC) 과 기존 기법 (V) 간의 성능 비교

참고문헌

- [1] G.J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas", *Bell Lab Tech. Journal.*, vol. 2, pp. 41-59, Autumn, 1996.
- [2] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna gaussian channels," *Eur Trans. Telecom.*, vol. 10, pp. 585-595, November 1999.
- [3] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 45, pp. 1456-1476, July 1999.
- [4] S. Lin, D.J. Costello, Jr., and M.J. Miller, "Automatic-repeat-request error control schemes," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 22, pp. 5-17, December, 1984.
- [5] M.J. Bartz and S.B. Wicker, "Type II Hybrid ARQ protocols using punctured MDS codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, pp. 1544-1557, Feb/Mar/April. 1994.
- [6] D. Chase, "Code combining -A maximum likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, pp. 385-393, May 1985.
- [7] E. N. Onggosanusi, A. G. Dabak, Y. Hui, G. Jeong, "Hybrid ARQ transmission and combining for MIMO systems", *Proc. IEEE Int. Commun. Confer. (ICC)*, pp. 3205-3209, Seattle, WA, U.S.A., May 2003.
- [8] K. Acolatse, Y. Bar-Ness, "An Alamouti-based Hybrid-ARQ scheme for MIMO systems", *Inform. Society Tech. (IST)*, Dresden, Germany, Jun, 2005
- [9] W. Tong, P. Zhu, M. Jia, J. Ma, H. Zhang, M. Fong, "Soft packet combining for STC re-transmission to improve H-ARQ performance in MIMO mode", *IEEE 802.16 Task Group e Contributing Documents*, Doc. IEEE 802.16e-04/113r2, July 2004.
- [10] E.N. Onggosanusi, A. Dabak, M. Ikram and S. Hosur, "Enhancement for 4-antenna soft packet combining scheme using unitary transformation", *IEEE 802.16 Task Group e Contributing Documents*, Doc. IEEE 802.16e-04/269r1, Aug. 2004