

다중사용자 다중입출력 시스템을 위한 채널품질 되돌림의 정보량 감쇄 기법

정희원 조면균*, 김영주**, 종신회원 홍대식***

Feedback Reduction of Channel Quality Information for Multiuser MIMO Systems

Myeon-gyun Cho*, Youngju Kim** *Regular Members*, Daesik Hong*** *Lifelong Member*

요약

다중사용자 다중입출력 시스템에서 채널 적응 기술을 사용하면 시스템의 통신용량을 증가시킬 수 있다. 하지만 이를 위해서는 많은 양의 사용자 채널품질 정보가 송신단에 되돌림되어야 한다. 다중사용자 다중입출력 시스템으로 기존에 제안된 per user unitary and rate control(PU2RC)는 사전코딩(precoding) 정보와 그때의 채널품질정보가 요구되며, 스케줄링의 효율이 떨어지는 단점이 있었다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 되돌림 정보량 줄이는 새로운 방법을 제안한다. 제안된 기법은 미리 알려진 사전코딩행렬을 사용하고 사용자의 채널 상황에 따라 선택적 되돌림(opportunistic feedback) 방법을 사용한다. 모의실험을 통하여 제안된 기법이 기존의 PU2RC 대비 훨씬 적은양의 되돌림 정보량으로 비슷한 통신용량 성능을 보장함을 보인다.

Key Words : Multiuser MIMO, Feedback Reduction, CQI, PU2RC

ABSTRACT

An opportunistic scheduling is adopted to improve the capacity of the system by exploiting the multiuser diversity of multiuser MIMO(MU-MIMO) systems. However it requires the large amount of feedback carrying the channel quality information(CQI) of each user to the transmitter. The considered per user unitary and rate control(PU2RC) needs to feedback the preferred precoding index and its CQIs, and it has a defect in scheduling the streams for the grouped user. In order to overcome these drawbacks, a novel feedback reduction scheme is proposed in this paper. It employs transmitter controlled precoding and opportunistic feedback(TCP-OFB). The simulation results demonstrate that TCP-OFB shows comparable performance to PU2RC while it only requires far reduced feedback load.

I. 서론

최근 시스템의 성능과 통신용량을 극대화 하기 위하여 송신단과 수신 단에서 다중 안테나를 사용하

는 다중입출력(MIMO) 시스템이 각광받고 있다^{1,2}. 특히 여러 사용자가 공간 자원을 효율적으로 스케줄링하여 사용하는 다중사용자 다중입출력(multiuser MIMO) 시스템이 제안되어 다중사용자 다이버시티

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신 연구진흥원의 대학 IT 연구센터 육성 지원 사업의 연구 결과로 수행되었음.

* 연세대학교 전기전자공학과 정보통신연구실 (pomn@itl.yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

*** 연세대학교 전기전자공학과 정보통신연구실 (rosman@itl.yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-05-226, 접수일자 : 2006년 5월 24일, 최종논문접수일자 : 2006년 7월 20일

(multiuser diversity) 이득을 획득함으로써 차세대 통신 시스템의 통신용량을 한층 높여 줄 것으로 기대되고 있다^{3, 4, 5}.

이처럼 사용자들마다의 공간 채널환경이 독립적임을 이용하여 다중사용자 다이버시티를 획득하는 한 방법으로 PU²RC(per user unitary rate control)가 제안되었는데, 이는 빔포밍(beam-forming), 공간분할다중접속방식(space division multiplexing: SDM), 공간분할다중접속방식(space division multiple access: SDMA)등을 모두 지원하는 특징이 있다⁶. 이 방식은 여러 개의 약속된 유니터리 사전코딩행렬(unitary precoding matrix)로 구성된 코드북(code book)을 사용하며, 동일 사전코딩행렬을 쓰는 사용자 그룹핑(user grouping)을 통하여 최고의 수신 품질을 가지는 사용자에게 벡터열의 스트림(stream)을 할당하여 공간축 자원을 활용하는 기법이다⁷. 하지만 기지국(base station)에서 스케줄링을 통해 공간 자원의 활용을 극대화 하기위해서는 모든 이동국(mobile station)이 자신에게 수신된 안테나 스트림별 채널품질 정보(channel quality information: CQI)를 상향 회선(uplink)을 통해 되돌림(feedback) 해야 한다. 요약하면 기존의 PU²RC 방법은 시스템 성능을 극대화 하기위해서 이동국(mobile station)이 선택할 사전코딩행렬의 인덱스와 이때의 각 스트림별 채널 품질을 알려 주어야 한다. 이로 인해 엄청난 상향회선의 부하가 예상되며 사용자수가 늘어남에 따라 되돌림 부하(feedback load)의 양도 커진다. 또한 코드북 내의 사전코딩행렬의 개수가 많아짐에 따라 사용자 그룹핑에 포함되는 사용자수는 줄어들게 되어 스케줄링에 의한 다중사용자 다이버시티 이득이 감소한다.

본 논문에서는 [6]에서 제안한 PU²RC를 기반으로 하여 통신용량 성능의 희생 없이 기존대비 훨씬 적은양의 되돌림 부하만이 요구되는 새로운 되돌림 방법을 제안한다. 기존 방법의 되돌림 부하는 되돌림에 참여하는 사용자수와 사전 코딩행렬을 알려주는 부분으로 구성되어 있는 점을 착안하여, 기회적 되돌림(opportunistic feedback) 방법을 통하여 스케줄링이 될만한 사용자만 되돌림에 참여하도록 하여 사용자 수를 제한하고, 미리 약속된 사전코딩행렬을 기지국에서 사용함으로써 되돌림 부하를 줄인다. 또한 사용자 그룹핑에 참여하는 사용자수를 일정수준 이상으로 확보함으로써 다중사용자 다이버시티 이득의 극대화를 꾀한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의

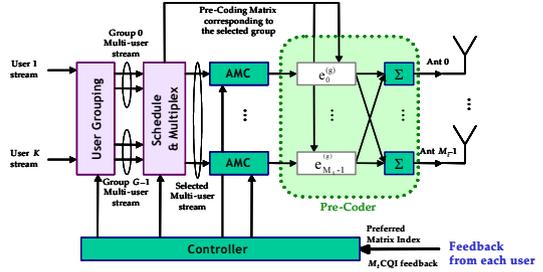


그림 1. 다중사용자 다중 입출력을 위한 PU2RC 시스템의 송신단

다중사용자 다중 입출력 시스템에 대해 설명하고, 이때의 되돌림 기법 및 다중사용자 다이버시티 얻는 방법을 소개하여 문제점을 도출한다. 3장에서는 새로운 되돌림 방법에 대해서 자세히 설명하고 4장에서는 모의실험을 통해 제안한 기법의 성능을 비교 확인하며, 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 다중사용자 다중입출력 시스템 모델

2.1 신호 모델링

본 논문에서는 다중사용자 다중입출력 시스템 중 최근 3GPP-LTE에 기고되고 있는 PU²RC 방식을 대상 시스템으로 고려한다⁶. 그림 1은 이 방식의 송신 단을 나타낸다. PU²RC 의 되돌림 정보량과 다중사용자 다이버시티를 향상시키기 위하여, 기존 시스템의 채널품질 되돌림 방식과 다이버시티 획득 방법에 대해서 알아본다. 먼저 사전코딩행렬과 수신 채널의 곱으로 구성된 실효채널(effective channel)은 다음과 같이 표현된다.

$$H_{effk}^{(g)} = H_k \cdot T^{(g)}, \quad g=[1,2, \dots, G] \quad (1)$$

여기서 H_k 는 $M_r \times M_t$ 의 k번째 사용자의 채널행렬이고, M_r, M_t 는 각각 수신, 송신 안테나 수를 나타낸다. $T^{(g)}$ 는 g번째 사전코딩행렬을 의미하며, G는 코드북 내의 사전코딩행렬의 수를 나타낸다. MMSE 수신기가 사용 되었을때, 실효채널을 이용하여, k번째 사용자의 L개중 m번째 스트림의 사후 처리 신호잡음비(post-processed SNR)을 정리하면 다음과 같다⁸(단 $L \leq \min(M_r, M_t)$).

$$\gamma_{M,k,m}^{(g)} = \text{where, } m=[1, \dots, M_t], \quad g=[0, \dots, G-1] \quad (2)$$

$$\left(h_{effk,m}^{(g)} \right)^H \left(\sum_{j=1}^{M_t} h_{effk,j}^{(g)} \cdot \left(h_{effk,j}^{(g)} \right)^H + \sigma^2 \cdot I \right)^{-1} \cdot h_{effk,m}^{(g)}$$

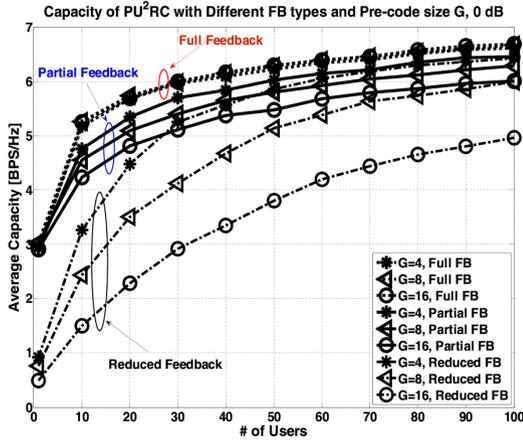


그림 2. Feedback 방식에 따른 기존 PU²RC의 채널용량 성능(코드북 사이즈 G={4,8,16}, SNR=0 dB)

이때, 코드북 내의 G개 사용가능한 사전코딩행렬 후보 중에서 사후처리 신호잡음비의 합(sum-rate)이 최대가 되는 것을 각 사용자는 최적의 사전코딩행렬(optimal precoding matrix)로 결정한다. k번째 사용자는 다음과 같이 최선의 사전코딩행렬을 선택한다.

$$T_k^{opt} = \arg \max_g \left(\sum_{m=1}^{M_k} \gamma_{M,k,m}^{(g)} \right) \quad (3)$$

G개의 사전코딩행렬로 구성된 코드북을 사용하고, L개의 스트림을 사용하는 PU²RC에서 쓰는 3가지의 채널품질정보 되돌림 방법 및 그때의 한 사용자당 되돌림 부하량(feedback load)을 요약하면 다음과 같다.

- 전체 채널품질정보 되돌림(Full CQI feedback)
모든 후보 사전코딩행렬과 이 각각에 대해 L개의 스트림에 대한 채널품질을 되돌림 한다. 이때의 부하량은 $I_{full} = G \times Q \times L$ 이고, 여기서 각 스트림은 Q bit의 해상도로 표현한다.
- 부분 채널품질정보 되돌림(Partial CQI feedback)
식 (3)에서 계산된 최선의 사전코딩행렬의 인덱스와 이때의 각 스트림별 채널 품질을 되돌림 한다. $I_{partial} = \log_2 G + Q \times L$.
- 감소된 채널품질정보 되돌림 (Reduced CQI feedback)
L개의 스트림 중에서 사후처리 신호잡음비가 최대 값을 가지는 1개만을 되돌림 한다. 그리고 이때의 사전코딩행렬 및 몇 번째 스트림인지 알려준다. $I_{reduced} = \log_2(G \cdot L) + 1 \times Q$.

기지국은 사용자가 보낸 채널품질정보 되돌림을 바탕으로 동일한 사전코딩행렬을 원하는 사용자들끼리 묶는 사용자 그룹핑(user grouping)을 행한다. 동일 그룹핑에 묶인 사용자에게 스트림을 할당했을 때 얻을 수 있는 총 채널용량을 계산해서, 가장 큰 값을 가지는 사전코딩행렬과 할당될 사용자들을 정한다. 이때 얻어지는 채널용량(channel capacity)을 정리하면 다음과 같다.

$$C_{PU^2RC} = \sum_{m=1}^{M_k} \max_k c_f(\gamma_{M,k,m}^{opt}), c_f(\gamma) = \log_2(1 + \gamma) \quad (4)$$

그림 2는 위에서 설명한 3가지의 서로 다른 되돌림 방법을 사용하여 기지국에서 스케줄링 했을 때의 총 채널용량을 그린 것이다. 미리 언급한 바와 같이, 코드북의 크기인 G가 커질수록 사용자 그룹핑에 묶이는 사용자의 수가 줄어들어 다중사용자 다이버시티 이득이 작아지고 이에 따라 채널용량도 줄어들음을 알 수 있다. 그러므로 채널품질정보 되돌림 양을 최소로 하면서 다중사용자 다이버시티 이득을 극대화 할 수 있는 새로운 방법이 요구된다.

III. PU²RC를 위한 새로운 되돌림 정보량 감쇄 기법

본 3장에서는 기존 PU²RC의 채널품질정보 되돌림 량을 줄이고 다중사용자 다이버시티를 크게 하기 위해 새로운 되돌림 방법을 제안한다. 먼저 기존의 되돌림 부하(feedback load)는 얼마나 많은 사용자(N_U)가 되돌림에 참여하는가와 코드북의 크기인 G가 얼마인지로 구성되어 있다⁹⁾.

$$I_o^{(PU)} = N_U \times (Q \times L + \lceil \log_2 G \rceil) \quad (5)$$

$$I_{reduced}^{(PU)} = N_U \times (Q \times 1 + \lceil \log_2(G \times L) \rceil)$$

그러므로 이런 되돌림 부하를 줄이기 위해서 되돌림에 참여하는 사용자수를 제한하고 어떤 사전코딩행렬을 썼는지 알려줄 필요가 없도록 되돌림 방법을 변경하도록 한다. 앞으로 제안하는 되돌림 방법은 TCP-OFB(transmitter controlled precoding with opportunistic feedback)로 통일하여 명기한다.

그림 3과 같이 기지국에서 사용자의 되돌림 정보를 바탕으로 사전코딩행렬을 정하는 것이 아니라, 미리 결정된 순서로 사전코딩행렬을 적용한다. 이렇게

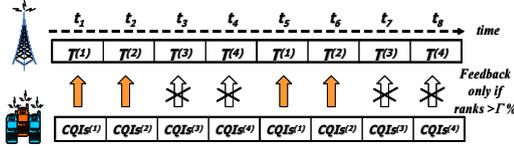


그림 3. 제한하는 TCP-OFB 방식의 개념도(G=4, Γ=50%)

함으로써 식 (5)에서처럼 G를 표현할 필요가 없으므로 그만큼의 되돌림 정보를 줄일 수 있다. 또한 지정된 사전코딩행렬을 사용하였을 때, 다른 후보 사전코딩을 사용하여 얻어지는 스트림별 사후처리 신호잡음비의 총합과 비교해서 상위 Γ% 이상일 때만 되돌림에 참여하고 그렇지 않을 때에는 되돌림에 참여하지 않아서 되돌림 정보를 보내지 않는다. 만약 현재 지정된 사전코딩행렬이 $T^{(g)}$ 라면 k번째 사용자의 채널용량은 $C_k(T^{(g)})$ 로 표현된다. 여기서 $C_k(T^{(min)})$ 와 $C_k(T^{(max)})$ 를 각각 사용자 채널용량이 최소가 되는 경우와 최대가 되는 경우라고 할 때, 되돌림에 참여하는 사용자 집합은 다음과 같다.

$$K = \{k | C_k(T^{(min)}) < \dots < \underbrace{C_k(T^{(g)}) < \dots < C_k(T^{(max)})}_{\Gamma\%} \} \quad (6)$$

예를 들면, 그림 3과 같이 코드북의 크기가 4인 경우에는 모든 사용자는 후보 사전코딩행렬에 대해서 채널용량을 계산해서, 크기를 비교 했을 때 상위 50%(즉 1등, 2등)인 경우에만 되돌림에 참여하고 3등 4등인 경우에는 되돌림 하지 않는다는 것이다. 이렇게 가능한 모든 사전코딩행렬 후보들을 적용하여 계산한 채널용량이 상위 Γ%에 해당하는 경우에만 사용자 k는 자신의 채널품질정보를 상향회선을 통해 전송한다. 즉 평균적으로 사용자의 Γ% 만이 되돌림에 참여하여 상향회선의 자원을 점유한다. 이렇게 함으로써 되돌림 부하를 다음과 같이 줄일 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{\theta}^{(TCP)} &= N_U \cdot \Gamma \times (Q \times L) \\ I_{reduced}^{(TCP)} &= N_U \cdot (Q \times 1 + \lceil \log_2 L \rceil) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 $0 < \Gamma < 1$ 이므로 되돌림 부하가 줄어들고, 사전코딩행렬은 미리 정해졌으므로 식 (5)와 비교했을 때 G는 생략될 수 있다.

제안하는 알고리즘의 또 다른 큰 장점은 매 사전 코딩행렬에 대하여 평균적으로 전체사용자의 Γ%가 항상 사용자 그룹핑에 참여하여 스트림 할당을 받기위해 경쟁하게 된다. 즉 이렇게 사용자 그룹핑에 묶이는 사용자의 수를 확보해 줌으로써 사용자가

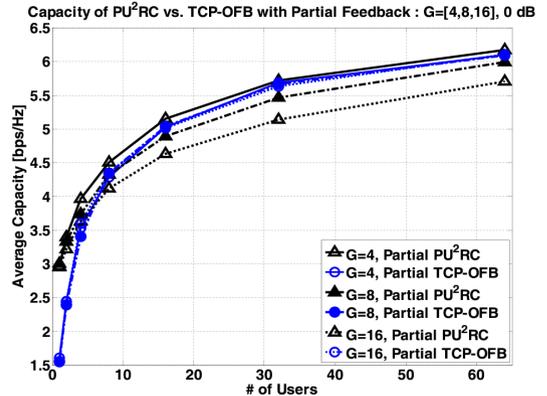


그림 4. 제한하는 TCP-OFB의 채널용량 성능(Partial Feedback 채택, G=[4,8,16])

적은 환경에서도 다중사용자 다이버시티를 얻을 수 있다. 최종적으로 제안하는 TCP-OFB를 사용한 경우에 획득 가능한 채널용량을 계산해 보면 다음과 같다.

$$C_{TCP-OFB}^{(g)}(t) = \sum_{m=1}^M \max_k c_f(\gamma_{M,k,m}^{(g)}(t)), \quad (8)$$

$$k \in K, g = \text{mod}(t, G)$$

여기서 $\gamma_{M,k,m}^{(g)}(t)$ 는 t번째 시간 슬롯에서 주어진 $T^{(g)}$ 사전코딩행렬을 사용 했을 때 계산되는 사후처리 SNR이고 $T^{(g)}$ 는 시간 슬롯(time slot) t에 따라 cyclic하게 변동된다.

IV. 모의 실험 결과

본장에서는 FFT 기반의 사전코딩행렬이 4,8,16개로 구성된 코드북을 이용하여 사전코딩을 행하는 4x4 MIMO 시스템을 가정하였다⁴⁾. 평균 SNR은 0dB이고 기존의 PU²RC를 사용하는 경우와 Γ=50%의 기준을 적용한 TCP-OFB를 사용할 경우의 partial/ reduced feedback 각각의 하향회선 통신용량(downlink capacity)을 비교 하였다.

그림 4는 partial feedback을 이용한 경우로서, 제안한 TCP-OFB가 코드북의 크기 G가 4이상인 경우에는 성능이 우수하고 G=4일 때는 사용자가 늘어남에 따라 거의 비슷한 성능을 보인다. 즉 코드북의 크기가 커짐에 따라, 기존 방법은 사용자 그룹핑으로 묶이는 사용자들이 여러 후보 사전코딩행렬로 분산되기 때문에 다중사용자 다이버시티가 줄어드는 반면에 제안된 TCP-OFB는 평균적으로 전체 중 50%의 사용자가 정해진 사전코딩행렬로

표 1. 되돌림 방식에 따른 Feedback load 비교

되돌림 방식	Feedback Load	(bits)
PU2RC	$Nu \times G \times L \times Q$	3200
PU2RC + Partial	$Nu \times (\log 2G + L \times Q)$	460
PU2RC + Reduced	$Nu \times (\log 2G \cdot L + 1 \cdot Q)$	200
TCP-OFB + Partial	$Nu \times \Gamma \cdot (\log 2G + L \times Q)$	200
TCP-OFB + Reduced	$Nu \times \Gamma \cdot (\log 2G \cdot L + 1 \cdot Q)$	70

여기서 사용자수(Nu)=20명, G=8, $\Gamma=0.5$, 스트림수 L=4, Q=5 bits

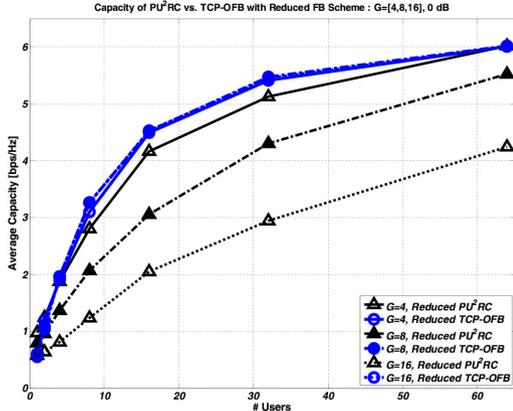


그림 5. 제안하는 TCP-OFB의 채널용량 성능 (Reduced Feedback 채택, G=[4,8,16], SNR= 0dB)

사용자 그룹핑 되고 경쟁을 통해 더 좋은 사용자에게 스트림이 할당되므로 다중 사용자 다이버시티 이득에 의해 더 좋은 성능을 나타낸다.

그림 5는 1개의 최대 스트림에 대한 정보를 알려 주는 reduced feedback을 사용한 경우의 성능비교를 나타낸다. 기존 PU²RC는 사용자가 적은 환경에서는, 4개의 할당가능 스트림이 효율적으로 활용되지 못하는 경우가 발생하지만, 제안된 TCP-OFB는 사용자 그룹핑에 묶이는 사용자수를 일정수준 이상으로 보장하므로 더 큰 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 표 1에 따라 feedback load를 고려하여 정리하면, 제안하는 TCP-OFB 방법은 약 Γ 배의 feedback load만으로 기존 PU²RC와 거의 비슷한 통신용량 성능을 낼 수 있다. 특히 reduced feedback을 적용하는 경우에는 1/3배의 feedback load로 더 큰 채널용량 성능을 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 사전코딩을 이용하는 다중사용자 다중입출력 시스템에서 최소의 feedback load만으로 기존의 방식대비 통신용량의 성능저하가 거의 없는

되돌림 방법을 제안하였다. 제안하는 TCP-OFB는 PU²RC와 비교하여 두 가지 큰 차이점을 가진다. 첫째는 송신 단이 사전코딩행렬을 미리 약속된 순서로 적용하여 보내는 방법이고 둘째는 사용자들이 적용될 사전코딩행렬을 적용했을 때 예상되는 성능이 일정수준 이상일 때만 되돌림에 참여하는 방법을 채택하였다. 이렇게 함으로써 feedback load의 양은 Γ 배로 줄이고 사용자 그룹핑에 참여하는 사용자수는 일정수준이상 보장함으로써 다중사용자 다이버시티 이득을 충분히 얻을 수 있다. 모의실험을 통하여 제안된 방식이 전체적인 통신용량의 성능의 희생 없이 요구되는 feedback overhead는 크게 줄일 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안된 TCP-OFB방식을 다중사용자 다중입출력 시스템에 적용하는 방식은 앞으로 전개될 차세대 시스템의 공간자원을 효율적으로 활용하는 방식으로 유망하게 적용될 수 있는 기술로 기대한다.

참고 문헌

- [1] R. D. Murch and K. B. Letaief, "Antenna systems for broadband wireless access," IEEE Commun. Mag., Vol.40, pp.76-83, Apr. 2002.
- [2] G. G. Raleigh and J. M. Cioffi, "Spatio-temporal coding for wireless communications," IEEE Trans. on Commun., Vol.46, pp.357-366, Mar. 1998.
- [3] Ajib, W.; Haccoun, D., "An overview of scheduling algorithms in MIMO-based fourth-generation wireless systems," Network, IEEE, Vol. 19, pp.43-48, Sept.-Oct. 2005.
- [4] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communications: Performance criterion and code construction," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.44, pp.744-765, Mar. 1998.
- [5] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," AT&T Bell Laboratories Internal Technical Memorandum, published in the European Transactions on Telecommunications, 1999.
- [6] Samsung Electronics, "Downlink MIMO for EUTRA," 3GPP TSG RAN WG1 num. 44/R1-060335, Feb. 2006.
- [7] R. Love, A. Ghosh, R. Nikides, L. Jalloul, M. Cudak, and B. Classon, "High Speed Downlink

