

다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템에서의 사용자 그룹화 CQI 반환 기법

강민규, 박진배, 김경준, 김광순
연세대학교 전기전자공학부
{kangys8, spacey2k, kimkj, kskim} @dcl.yonsei.ac.kr

User Grouping CQI Feedback Scheme for Multiuser MIMO-OFDMA Systems

Mingyu Kang, Jin-Bae Park, Kyungjun Kim, Kwang Soon Kim
Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University
134 Sinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

요 약

본 논문에서는 다중 사용자 다중 안테나-직교 주파수 분할 다중 접속 방식(MIMO-OFDMA) 시스템에서 반환 정보량을 줄이기 위한 사용자 그룹화 CQI 반환 기법(UGCQI)을 제안한다. 모든 사용자가 모든 부채널들의 채널 상태 정보(CQI)를 반환하는 기법(FCQI)은 과도한 반환 정보량으로 인하여 사용자가 많거나 채널의 시간 및 주파수 선택성이 클 경우 상향 링크 과부하로 실제 시스템에서는 구현하기 힘든 단점을 갖고 있다. 제안하는 반환 기법은 사용자를 미리 정해진 수의 그룹으로 나누어 각 사용자가 자신이 속한 그룹에 정해진 부채널들에 대해서만 채널 상태를 반환하는 방식으로서, 이를 사용하면 사용자가 많을 경우 다중 사용자 다양성 이득에 의한 높은 하향 링크의 성능은 유지하면서 상당한 양의 반환 정보량을 줄일 수 있다. 또한 본 논문에서는 채널 특성에 따라 최적화된 UGCQI 로부터 얻어지는 시스템 성능을 분석하고, QoS(quality of service)를 만족시키기 위한 채널의 특성에 대해서 분석한다.

1. 서론

차세대 광대역 무선 통신 기술로서 각광을 받고 있는 직교 주파수 분할 다중 접속 방식(OFDMA)은 높은 주파수 효율을 제공하며, 간단한 채널 등화기를 이용하여 주파수 선택적 감쇄 채널을 다수의 직교 주파수 비선택적 채널들로 해석할 수 있게 해줌으로써 자원 할당 및 적응 변조와 부호화(AMC) 적용 측면에서의 높은 유연성을 갖는 등 여러 장점들을 가지고 있다 [1][2]. 이러한 OFDMA 시스템의 각 부채널들을 채널 이득이 가장 우수한 사용자에게 할당함으로써 다중 사용자 다양성 이득(multiuser diversity gain)으로부터 얻어지는 시스템 성능 향상을 도모할 수 있다 [3][4]. 또한 단일 경로 채널 모형에서 많은 연구가 진행되어온 다중 안테나 기술(MIMO)은 OFDMA 와 쉽게 접목되어 시스템의 성능을 높이는데 기여할 수 있다 [5][6]. 그중에 공간 분할 다중 접속 방식(SDMA)은 선형 및 비선형 수신기를 이용하여 송수신단간에 형성된 다중 안테나 채널을 다수의 병렬 부채널로 해석하여 각 부채널들을 서로 다른 사용자에게 할당하는 다중 접속 방식으로서, OFDMA 의 각 부반송파에 적용하면 추가적인 다중 사용자 다양성 이득을 얻을 수 있다.

그러나 비록 다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템이 자원 할당 측면에서의 높은 유연성을 제공하지만, 최대 다중 사용자 다양성 이득을 얻기 위해서는 모든 사용자가 자신의 모든 채널들의 신호 대 잡음 및 간섭비(SINR) 또는 채널 용량(channel capacity) 등의 채널 상태 정보(CQI)를 기지국에 반환(FCQI)해야 한다. 특히, 사용자가 상대적으로 많거나, 채널들의 시간 및 주파수 선택성이 낮지 않을 경우 과도한 반환 정보량이

필요하게 되며, 이는 반환이 이루어지는 상향 링크에 과부하를 주기 때문에 실제 시스템에서는 구현하기 힘든 문제점을 갖고 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 합리적인 반환 정보량으로 높은 시스템 성능을 얻을 수 있는 효율적인 반환 기법이 요구된다. 이에 본 논문에서는 사용자를 미리 정해진 수의 그룹으로 미리 나누어 각 사용자가 자신이 속한 그룹에 정해진 부채널들에 대해서만 채널 상태를 반환함으로써 다중 사용자 다양성 이득에 의한 높은 하향 링크의 성능은 유지하면서 상당한 양의 반환 정보량을 줄일 수 있는 사용자 그룹화 반환 기법(UGCQI)을 제안한다.

본 논문은 II 장에서 시스템 모형에 대해서 설명하고, III 장에서는 제안하는 반환 방식을 설명하고 제안하는 방식을 사용하였을 경우에 얻을 수 있는 하향 링크의 성능에 대해서 분석한다. IV 장에서는 채널 특성에 따라 최적화된 UGCQI 의 시스템 성능을 분석하고, QoS 를 만족시키기 위한 채널 특성에 대해 분석하며, V 장에서 결론을 맺는다.

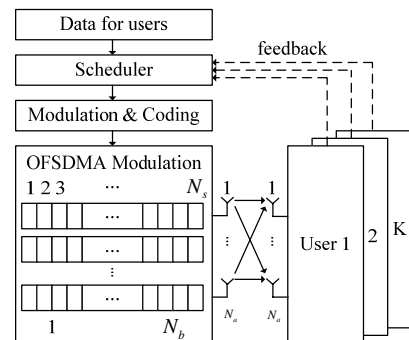


그림 1. MIMO-OFDMA 시스템 모형

II. 시스템 모형

본 논문에서는 그림 1 과 같이 단일 셀 내에 K 명의 사용자와 N_s 개의 부반송파로 이루어진 MIMO-OFDMA 시스템을 고려하였다. 한 OFDM 심볼의 주기는 T 이며, 기지국과 사용자는 동일한 개수(N_a)의 안테나를 가지고 있다. 한 부대역은 채널의 주파수 선택성에 따라 정해지는 N_c 개의 부반송파로 이루어져 있으며, 이 때 한 OFDM 심볼은 N_b 개 ($=N_s/N_c$)의 부대역과 $N_a N_b$ 개의 부채널로 이루어지게 된다. k 번째 사용자의 n 번째 부반송파에서의 수신 신호 $\mathbf{y}_{k,n} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}_{k,n} = \mathbf{H}_{k,n} \mathbf{x}_n + \mathbf{n}_{k,n}. \quad (1)$$

$\mathbf{x}_n \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 는 기지국의 n 번째 부반송파에서의 송신 신호이며, $\mathbf{n}_{k,n} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 는 잡음으로, 서로 독립이며 평균이 0 이고 분산이 N_o 인 복소 가우시안(complex Gaussian) 랜덤 변수로 구성된다. 채널 $\mathbf{H}_{k,n}$ 는 서로 독립이며 평균이 0 이고 분산이 1 인 복소 가우시안 랜덤 변수들을 원소로 갖는 $N_r \times N_t$ 행렬이다. 시스템 성능 분석 시 채널의 시간 및 주파수 선택성을 고려하기 위하여 각 사용자의 채널은 T 에 정수 N_{OFDM} 이 곱해진 시간 동안 변하지 않고, 한 부대역에 존재하는 N_c 개의 부반송파들은 서로 동일한 채널을 갖는다고 가정한다. 또한 서로 다른 사용자 및 부대역들의 채널은 서로 독립이라 가정한다. 이 때 기지국이 모든 반송파에 동일한 전력(E_s)을 할당하고, 모든 사용자가 ZF(zero-forcing) 수신기를 사용할 경우 각 부채널의 수신 전력 대 잡음비(SNR, $X_{k,n}$)의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다 [7].

$$f_{X_{k,n}}(x) = \frac{N_a}{\rho} e^{-\frac{N_a}{\rho} x}, \quad x > 0, \quad \rho = \frac{E_s}{N_o}. \quad (2)$$

뒤에서 이어질 제한 기법들의 성능 분석을 위하여 기지국이 한 부대역에 제한된 K 개의 CQI 를 내림차순으로 정렬한 것 중 항상 k 번째 크기의 CQI 를 선택할 때의 평균 채널 용량을 정의한다. 식 (2)와 같은 분포를 갖는 서로 독립적인 K 개의 CQI, X 를 내림차순으로 정렬할 때 k 번째 CQI, $Y_{K,k}$ 의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} f_{Y_{K,k}}(y) &= \frac{K!}{(k-1)!(K-k)!} F_X^{k-1}(y) [1-F_X(y)]^{K-k} f_X(y) \\ &= \frac{K!}{(k-1)!(K-k)!} \frac{N_a}{\rho} \sum_{m=0}^{k-1} \binom{k-1}{m} (-1)^m e^{-\frac{N_a}{\rho}(K-k+m+1)y}. \end{aligned} \quad (3)$$

또한 그에 상응하는 평균 채널 용량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_K(k) &= E \left[\log_2(1+Y_{K,k}) \right] = \int_0^\infty \log_2(1+y) f_{Y_{K,k}}(y) dy \\ &= \frac{K!}{(k-1)!(K-k)!} \sum_{m=0}^{k-1} \frac{(-1)^m \log_2(e)}{K-k+m+1} \binom{k-1}{m} \\ &\quad e^{\frac{N_a}{\rho}(K-k+m+1)} E_1 \left(\frac{N_a}{\rho} (K-k+m+1) \right). \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 $E_1(x)$ 는 1 차 지수 적분 함수(first order integral function)이며 [8, Eqs. (8.211.1)], 다음과 같이 주어진다.

$$E_1(x) = \int_x^\infty e^{-t} t^{-1} dt. \quad (5)$$

III. 기존의 FCQI 와 제안하는 UGCQI 기법과 하향 링크 성능 분석

1. 모든 사용자가 모든 부채널들의 CQI 를 제한하는 기법 (FCQI)

FCQI 의 경우에는 기지국이 모든 사용자들의 모든 부채널들의 CQI 를 이용하여, 각 부채널들을 CQI 가 가장 큰 사용자에게 할당하므로, 그에 따른 하향 링크의 평균 채널 용량은 다음과 같이 주어진다.

$$C_{FCQI} = E \left[\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_b} \log_2 \left(1 + \max_{k \in K} X_{k,i,j} \right) \right]. \quad (6)$$

여기서 $X_{k,i,j}$ 는 k 번째 사용자의 j 번째 부반송파의 i 번째 안테나에 해당하는 부채널의 CQI 를 나타낸다. 시스템 모형에서 한 부대역 내에 존재하는 부반송파들의 채널은 동일하며, 서로 다른 사용자 및 부대역들의 채널이 서로 독립이라 가정하였으므로 FCQI 의 평균 채널 용량은 식 (3), (4)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{FCQI} &= \frac{N}{N_b} E \left[\log_2 \left(1 + \max_{k \in K} X_k \right) \right] \\ &= N_a \int_0^\infty \log_2(1+y) f_{Y_{K,K}}(y) dy \\ &= N_a C_K(K). \end{aligned} \quad (7)$$

FCQI 의 경우 필요한 제한 정보량은 다음과 같다.

$$N_{FCQI} = N N_q K \text{ [bits]}. \quad (8)$$

여기서 N_q 는 한 CQI 를 양자화하기 위하여 필요한 비트 수를 나타낸다. 비록 FCQI 가 가장 높은 하향 링크의 성능을 제공하지만, 총 부채널 수와 사용자 수에 비례하여 증가하는 막대한 제한 정보량을 필요로 한다는 단점이 있다.

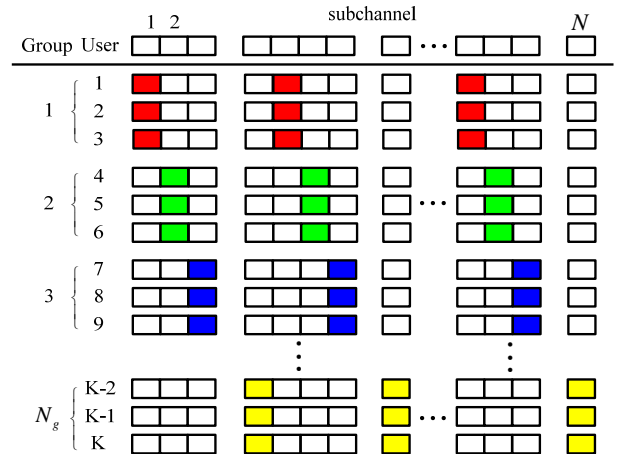


그림 2. 사용자 그룹화 CQI 피드백 기법

2. 제안하는 사용자 그룹화 CQI 피드백 기법 (UGCQI)

FCQI의 경우 사용자의 수가 증가할수록 제한 정보량은 그에 비례하여 증가하지만, 하향 링크의 성능은 $O(N_a \log \log(K))$ 와 같이 느린 속도로 증가한다 [9]. 제안하는 사용자 그룹화 CQI 피드백 기법(UGCQI)은 사용자의 수가 많은 경우 사용자를 미리 적절한 개수의 그룹으로 나누어, 각 사용자가 자신이 속해있는 그룹에 정해진 부채널들에 대해서만 CQI를 제한함으로써, 그에 따른 성능 악화는 크지 않으면서 상당한 양의 제한 정보량 감소를 가능하게 하는 방식이다. 그림 2는 UGCQI에서 사용자들이 기지국에 CQI를 제한하는 방식을 나타낸다.

분석의 편의를 위하여 부채널 수 N 과 사용자 수 K , 그룹 개수 N_g 는 2의 지수꼴의 값을 갖는다고 가정한다. 이 경우 각 부채널에 제한되는 CQI의 개수는 K/N_g 이 되므로 하향 링크의 평균 채널 용량은 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{UGCQI}(N_g) = N_a C_{K/N_g} (K/N_g). \quad (9)$$

UGCQI의 경우 N_g 에 따른 제한 정보량 $F_{UGCQI}(N_g)$ 은 식 (10)과 같으며 N_g 가 증가할수록 제한 정보량이 감소하게 된다.

$$F_{UGCQI}(N_g) = N \times N_q \times K/N_g. \quad (10)$$

그림 3은 K 가 각각 64, 1024이고, $E_s/N_o=10\text{dB}$, $N_s=1024$, $N_a=2$, $N_b=16$, $N_c=64$ 인 경우에 대하여 UGCQI를 사용하였을 때 제한 정보량에 따른 하향 링크의 평균 채널 용량을 FCQI($N_g=1$) 대비 백분율로 나타낸 것이다. N_g 가 증가할수록 하향 링크의 성능에 비해 제한 정보량이 더 빠른 속도로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히 사용자가 1024명인 경우 약 10%의 제한 정보량만을 가지고 약 90%의 하향 링크 성능을 얻을 수 있다. 이와 같은 성능 향상은 그룹수가 증가하면서 제한 정보량이 크게 감소하는 반면 부채널당 얻는 다중 사용자 다양성 이득이 크게 감소하지 않는다는 점으로부터 기인한 것이다.

IV. 채널 특성에 따른 UGCQI 최적화 및 성능 분석

UGCQI의 경우 채널의 특성에 따라서 전체 시스템 성능이 최대화되도록 최적의 N_g 값을 구하여 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 여기서 전체 시스템 성능이란 데이터 전송을 위한 하향 링크의 주파수 대역 (bandwidth)에 제한 시 사용되는 상향 링크의 주파수 대역을 포함한 전체 주파수 대역 대비 얻을 수 있는 데이터 전송량(throughput)이다. 표준 OFDM 변복조를 사용할 경우 하향 링크와 상향 링크에 필요한 주파수 대역 W_{DL}, W_{UL} 은 다음과 같이 나타난다.

$$W_{DL} = \frac{N_s}{T} [\text{Hz}], \quad W_{UL} = \frac{F_{UGCQI}(N_g)}{C_{UL} N_{OFDM} T} [\text{Hz}]. \quad (11)$$

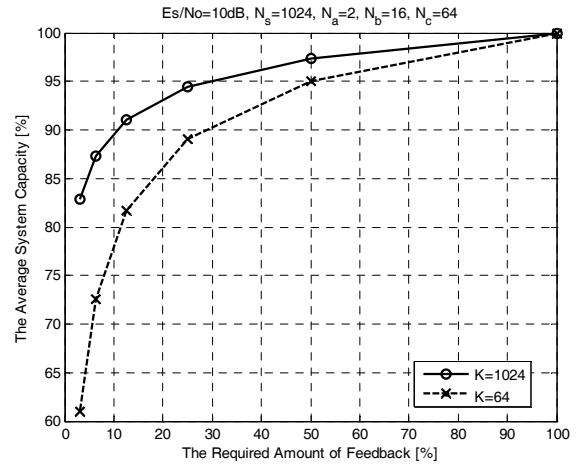


그림 3. 제한 정보량에 따른 UGCQI의 하향 링크 성능

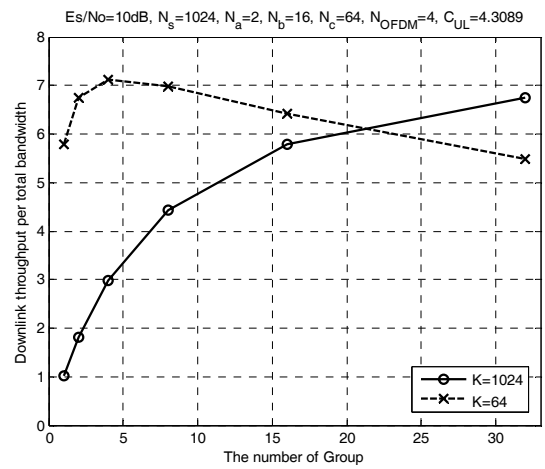


그림 4. N_g 에 따른 UGCQI의 하향 링크 성능

여기서 C_{UL} 은 ZF을 이용하여 얻을 수 있는 상향 링크의 평균 채널 용량으로, 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{UL} = N_a E[\log_2(1+X)] = N_a C_1(1) = N_a \log_2(e) e^{N_a/\rho} E_1(N_a/\rho). \quad (12)$$

W_{DL}, W_{UL} 에 따른 전체 주파수 대역 대비 데이터 전송량은 다음과 같다.

$$S_{UGCQI}(N_g) = \frac{C_{UGCQI}(N_g) W_{DL}}{W_{DL} + W_{UL}} = \frac{C_{UGCQI}(N_g) N_{s,DL}}{N_{s,DL} + \frac{F_{UGCQI}(N_g)}{C_{UL} \cdot N_{OFDM}}} [\text{bps/Hz}]. \quad (13)$$

그림 4는 K 가 각각 64, 1024이고, $E_s/N_o=10\text{dB}$, $N_s=1024$, $N_a=2$, $N_b=16$ 이며, 채널 특성을 나타내는 N_c, N_{OFDM} 가 각각 64, 4인 경우에 대하여 N_g 에 따른 시스템 성능을 나타낸 것이다. 위와 같은 환경에서 사용자의 수가 상대적으로 적은 64명인 경우에는 필요한 제한 정보량이 많지 않아 전체 부채널을 비교적 작은 수인 4개의 그룹으로 나눌 때 하향 링크의 성능이 크게 줄지

않으면서 전체 시스템 성능이 최대값을 갖는다. 반면에 사용자의 수가 상대적으로 많은 1024 명인 경우에는 과도한 제한 정보량을 줄이기 위해 N_g 가 부채널을 나눌 수 있는 최대 그룹수, 즉 $N (=32)$ 을 최적의 값으로 가지며 최대화된 시스템 성능을 나타낸다.

채널 특성에 따른 UGCQI 의 시스템 성능을 분석하기 위하여 다음과 같이 QoS(quality of service)를 정의한다.

$$QoS = \frac{S_{UGCQI}^*}{C_{FCQI}} \times 100 \quad [\%]. \quad (14)$$

여기서 S_{UGCQI}^* 는 최적화된 UGCQI 의 시스템 성능을 나타내며 채널의 특성에 의하여 그 값이 정해진다. QoS 가 높을수록 S_{UGCQI}^* 가 C_{FCQI} 에 근접해지게 되며, 이는 곧 채널이 UGCQI 를 이용하여 다중 사용자 다양성 이득에 의한 높은 하향 링크의 성능을 유지하며, 제한에 필요한 상향 링크의 주파수 대역의 크기를 감소시킬 수 있는 좋은 특성을 가지고 있음을 의미한다.

그림 5 는 $K=128$, $E_s/N_o=10\text{dB}$, $N_s=1024$, $N_a=2$ 인 경우에 대하여 각각 FCQI 와 UGCQI 를 사용하였을 때 채널의 시간 및 주파수 선택성을 나타내는 N_{OFDM} , N_c 에 따라 얻을 수 있는 QoS level 을 나타낸 것이다. 두 방식 모두 N_{OFDM} , N_c 가 큰 영역, 즉 채널의 시간 및 주파수 선택성이 작은 영역에서 높은 QoS level 을 얻는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 모든 영역에서 UGCQI 가 FCQI 보다 더 높거나 같은 QoS level 을 얻을 수 있음을 관찰할 수 있으며, 특히 N_{OFDM} , N_c 가 작은 영역, 즉 채널의 시간 및 주파수 선택성이 상대적으로 커서 사용자가 시간당 전송해야 하는 제한 정보량이 많아 효율적인 제한 기법이 더욱더 필요시되는 영역에서 UGCQI 가 더 높은 QoS level 을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다.

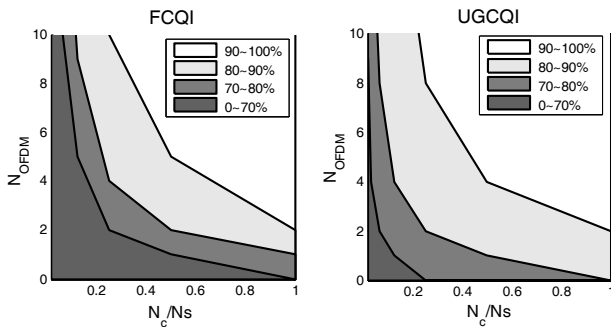


그림 5. N_{OFDM} , N_c 에 따라 얻을 수 있는 QoS level

V. 결론

본 논문에서는 다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템에서 사용자를 미리 정해진 수의 그룹으로 나누어 각 사용자가 자신이 속한 그룹에 정해진 부채널들에 대해서만 CQI를 제한하여, 제한 정보량을 줄이면서 시스템의 성능을 높일 수 있는 방식을 제안하였다. 제안한 방법의 하향 링크 성능과 함께, 채널의 특성에 따라 최적화된 시스템 성능을 관찰함으로써 기존의 FCQI보다 우수한 성능을 나타냄을 보였다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2007-(C1090-0701-0003)).

참고 문헌

- [1] T. Keller and L. Hanzo, "Adaptive multicarrier modulation: a convenient framework for time-frequency processing in wireless communications," in *Proc. IEEE*, vol.88, no.5, pp.611-640, May 2000.
- [2] K. S. Kim, "Adaptive modulation and power allocation technique for LDPC-coded MIMO-OFDMA cellular systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E88-B, pp.4410-4412, November 2005.
- [3] R. Knopp and P. Humblet, "Information capacity and power control in single cell multiuser communications," *Proc. IEEE Inter. Commun. Confer. (ICC)*, Seattle, WA, June 1995.
- [4] P. Viswanath, D.N.C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.48, no.6, pp.1277-1294, June 2002.
- [5] A. Paulraj and T. Kailath, "Increasing capacity in wireless broadcast systems using distributed transmission / directional reception," *US Patent*, 5 345 599, 1994.
- [6] I. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Trans. Telecomm.*, vol.10, no.6, pp.585-595, November/December 1999.
- [7] D. Gore, R. W. H. Jr., and A. Paulraj, "On performance of the zero forcing receiver in presence of transmit correlation," in *Proc. IEEE Inter. Symp. Inform. Theory (ISIT)*, p.159, Lausanne, Switzerland, June/July 2002.
- [8] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, eds., *Table of Integrals, Series, and Products*, 1994.
- [9] J. Chen, R. Berry, M. Honig, "Asymptotic Analysis of Downlink OFDMA Capacity," *Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, IL, USA, September, 2006